

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Možnosti využití technologie vysokorychlostního
abrazivního suspenzního paprsku v praxi**

**Possibilities of Application of High Speed Abrasive
Suspension Jet Technology in Practice**

Student:

František Kopp

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student:

František Kopp

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

**Možnosti využití technologie vysokorychlostního abrazivního
suspenního paprsku v praxi
Possibilities of Application of High Speed Abrasive Suspension Jet
Technology in Practice**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Využití abraziva při intenzifikaci řezných schopností vodních paprsků.
4. Rozdíly mezi abrazivním a suspenním vodním paprskem – účinnost, náklady na řezání, rychlost řezání, spotřeba abraziva apod.
5. Stanovení možných oblastí použití abrazivního suspenního paprsku.
6. Analýza zjištěných poznatků, závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [3] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry

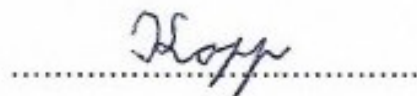

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci na téma *Možnosti využití technologie vysokorychlostního abrazivního suspenzního paprsku v praxi* vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literární zdroje.

V Ostravě: 15.5.2017

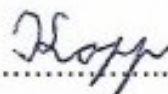


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla, školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2017



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

František Kopp

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Rohle 82,

Rohle, 789 74

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KOPP, F. *Možnosti využití technologie vysokorychlostního abrazivního suspenzního paprsku v praxi: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 75s. Vedoucí práce: Sitek, L.

Bakalářská práce se zabývá možnostmi využití technologie vysokorychlostního abrazivního suspenzního paprsku v praxi. Práce je psaná formou literární rešerše. Popisuje nejen historický vývoj vodních paprsků a jejich postupné pronikání do průmyslu, ale také zařazení vodních paprsků v oblasti nekonvenčních technologií obrábění s podrobným popisem nejdůležitějších komponentů, včetně výhod a nevýhod vodních paprsků. Na konci práce je pak uvedeno srovnání technologií abrazivního vodního a abrazivního suspenzního paprsku a popsáno možné komerční využití suspenzních paprsků.

Klíčová slova:

vodní paprsek, suspenzní paprsek, nekonvenční technologie, kvalita povrchu, obrábění

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KOPP, F. *Possibilities of Application of High Speed Abrasive Suspension Jet Technology in Practice: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining, assembly and engineering metrology, 2017, 75p. Thesis head: Sitek, L.

This bachelor thesis deals with the possibilities of application of high speed abrasive suspension (slurry) jet technology in practice. The thesis is written in the form of literary research. The thesis describes not only the historical development of water jets and their gradual penetration into the industry, but also the inclusion of water jets in the field of unconventional machining technologies with a detailed description of the most important components, including advantages and disadvantages of water jets. At the end of the thesis, the comparison of both technologies of the abrasive water jet and the abrasive suspension jet and the possible commercial use of suspension jets are described.

Key words:

water jet, suspension jet, unconventional technology, surface quality, machining

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. z Ústavu geoniky AV ČR za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracovávání závěrečné práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Janu Povýšilovi, Ph.D. za poskytnutí informací o formálním a strukturálním zpracování bakalářské práce. Závěrem bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého mého studia na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava.

Obsah bakalářské práce

Obsah	7
Úvod	10
Cíl práce	11
1. Historický vývoj využití technologie vodních paprsků	12
1.1 Historické využití energie vody	12
1.2 Moderní využití energie vody	13
2. Popis, charakteristika a zařazení technologie vodních paprsků	16
2.1 Nekonvenční technologie obrábění	16
2.2 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění	17
2.3 Rozdělení technologie vysokorychlostních vodních paprsků	18
2.3.1 Výhody a nevýhody technologie vodních paprsků	21
2.4 Technologie WJM (Water Jet Machining)	23
2.5 Technologie AWJM (Abrasive Water Jet Machining)	24
2.6 Technologie IJM (Ice Jet Machining)	26
2.7 Technologie DWJ (Dynamic Water Jet)	26
2.8 Technologie pulzních paprsků	28
2.9 Technologie ASJM (Abrasive Suspension Jet Machining)	30
3. Hlavní komponenty systému pro technologie vodních paprsků	34
3.1 Vysokotlaká čerpadla	34
3.2 Multiplikátory	37
3.3 Řezací hlavy	38

3.3.1 Vodní trysky	41
3.4 Zaostřovací trubice	42
3.5 Vysokotlaké potrubí	43
3.6 Zařízení pro úpravu vody a aditiva	43
3.6.1 Mechanická úprava vody	44
3.6.2 Změkčování	44
3.6.3 Deionizace	45
3.6.4 Reverzní osmóza	45
3.6.5 Biologická úprava	45
3.6.6 Aditiva	45
3.7 Řezací stoly	46
3.8 Dávkořab abraziva	47
3.9 Software pro zadávání vstupních dat a řízení pohybu	47
3.10 Těsnění a filtry	48
3.11 Abrazivo	50
4. Srovnání technologie AWJ a ASJ	53
4.1 Technologické a účinnostní rozdíly	53
5. Oblasti možných využití ASJ technologie	57
5.1 Počátky komerčního využití	57
5.2 Parametry ovlivňující účinnost paprsku	60
5.3 Vývoj polymerů u technologie ASJ	61
5.4 Studie DIAjet systému	62
5.5 Budoucnost technologie	64

Závěr	65
Seznam použitých zdrojů	67
Seznam obrázků	71
Seznam použitých zkratek a symbolů	73
Seznam použitých zkratek	73
Seznam použitých symbolů	75

Úvod

Od nepaměti byl člověk svědkem obrovského energetického potenciálu vody, což vyvolávalo otázku jejího možného využití. Již na počátku 30. let 20. století našla síla vody uplatnění v těžebním průmyslu. Následně v průběhu dalších let pro čisticí práce, kde se využívalo nižších tlaků (řádově v desítkách MPa). Pro potřeby obrábění se začala postupně využívat až s rozvojem čerpací techniky v druhé polovině 20. století. Právě voda má primární zastoupení jako pracovní médium v technologii vysokorychlostních vodních paprsků.

Vzhledem k technologickému pokroku, ve kterém se stále zdokonalují vysokopevnostní těžkoobrobitelné materiály a zároveň stále více rostou nároky na kvalitu a ekologičnost procesu se do popředí díky svým pozitivním vlastnostem stále častěji dostává technologie vodních paprsků. Technologie vodních paprsků se řadí mezi tzv. nekonvenční technologie obrábění, které k úběru materiálu využívají jiného než tradičního principu. Nejpoužívanější a nejrozšířenější jsou v zásadě dva typy paprsků a to čistý vodní paprsek a abrazivní vodní paprsek, který obsahuje abrazivo pro zesílení obráběcích schopností. Mezi postupně se rozšiřující typy paprsků lze zařadit například abrazivní vodní mikropaprsek, ultrazvukem modulovaný vodní paprsek či abrazivní suspenzní vodní paprsek.

Technologie abrazivních vodních paprsků využívající hydroabrazivní způsob obrábění se vzhledem k rychlému rozvoji a zdokonalování setkala s obrovským komerčním úspěchem v mnoha odvětvích průmyslu. Díky rozsáhlým možnostem použití je technologie vodních paprsků v některých oborech dokonce nenahraditelná. Již z tohoto důvodu je zřejmé, že její výhody mnohonásobně převyšují nedostatky. Významného rozmachu dosáhla i stále se rozvíjející technologie vysokorychlostních abrazivních suspenzních vodních paprsků, kterou se podrobněji zabývám ve své bakalářské práci.

Mezi největší průkopníky v oblasti vysokorychlostních vodních paprsků se řadí americká společnost Flow International Corporation.

Cíl práce

Vzhledem k tomu, že má bakalářská práce neobsahuje experimentální část, je hlavním cílem mé práce vytvořit pomocí studia literárních zdrojů rešerši, která čtenáře stručně provede vývojem a současností technologie vodních paprsků, zejména pak abrazivních vodních paprsků.

Práce chce seznámit čtenáře s technologií vodních paprsků a s jejím zařazením v nekonvenčních technologiích obrábění, stručně uvést historii s postupným rozvojem vodních paprsků. Dále vysvětlit fyzikální princip činnosti, popsat rozdělení paprsků podle různých kritérií a uvést možné výhody a nevýhody technologie vodních paprsků.

Mezi další cíle lze zařadit také rozbor technologických možností s podrobnějším popisem nejdůležitějších komponentů v systému vodních paprsků.

Avšak primárním cílem bakalářské práce zůstává analýza možností uplatnění technologie abrazivního suspenzního paprsku v praxi. Poslední část mé práce se proto zabývá rozdíly mezi abrazivním a abrazivním suspenzním vodním paprskem, analýzou zjištěných poznatků a především stanovením možných oblastí využití abrazivního suspenzního paprsku v průmyslových aplikacích.

1. Historický vývoj využití technologie vodních paprsků

1.1 Historické využití energie vody

V přírodě se síla vody projevuje již miliony let, například ve formě eroze přetváří tvar Země. Její účinky v přírodě lze nejlépe demonstrovat při vymílání břehů či vytváření kaňonů. Sám člověk se neustále setkává s důsledky působení vody a už od nepaměti se vodní energii snaží podmanit k nejrůznějším účelům pro svoji potřebu. V dnešní době je vodní energie dokonce jeden z nejvyužívanějších zdrojů obnovitelné energie [5,11].

Zřejmě nejstarší myšlenka na využití vodní energie pro porušení vazeb mezi materiály je zaznamenána na egyptských deskách uložených v Britském muzeu, které se datují přibližně do 4. tisíciletí př. n. l. Na deskách je vyobrazena zmínka o možnosti využití energie vody k oddělení zlata od hlušiny. Zaznamenanou realizaci využití vodní energie pak začali využívat i staří Římané k dobývání nerostných surovin. Princip spočíval v tom, že nad zlatonosnými poli byla systematicky umístěna obrovská vodní nádrž. Po úplném naplnění nádrže došlo k otevření stavidel a nasměrování proudu vody na rozkopané nánosy skal a zeminy. Následně byl přes systém žlabů rozmočený materiál odnášen do rýh, ve kterých se zlatonosné rudy usazovaly, a hlšina se odváděla do moře [1, 2, 5].

Největším problémem této doby bylo nerealizovatelné dosažení vyšších pracovních tlaků vody, díky kterým by se objevily další možnosti využití. Je tedy přirozené, že k největšímu rozvoji využití vodní energie k rozpojování materiálů došlo teprve až s vývojem čerpací techniky. Obrovského rozkvětu se dosáhlo přibližně v polovině 19. století, tedy v době tzv. zlaté horečky ve Spojených státech amerických, kde se energie vody využívala při těžbě zlata. První využití kinetické energie vody v době zlaté horečky se datuje do roku 1853. Podobný typ technologie byl využit také při dobývání nerostných surovin v roce 1867 v okolí Bajkalského jezera na Sibiři. V souvislosti s hornickými operacemi se začal využívat tzv. hydromonitor neboli zařízení, jehož princip spočíval v usměrnění vodního proudu na průměr několika desítek cm. Takový proud byl pak vrhán až na vzdálenost sto i více metrů [2, 3, 5].

V roce 1936 byla v Sovětském svazu vypracována studie, díky které autor obdržel patent na použití vodního paprsku při vrtání děr v báňském průmyslu. O rozvoj a pozdější uplatnění v praxi se zasloužil zejména Petr Tupitsyn v uhelných dolech v Doněcku na Ukrajině. Mezi léty 1950 – 1960 byl proud kapaliny úspěšně využíván při těžbě a často i

dopravě fosfátu v Egyptě, uhlí a uranu v Sovětském Svazu a dokonce i olova na Novém Zélandu. Používaný tlak vody však stále nepřekročil řádově desítky MPa [2, 11].



Obr. 1.1 Využití hydromonitorů při dobývání nerostů [45].

1.2 Moderní využití energie vody

Za počátky moderního využívání vodního paprsku je považován konec 60. let 20. století a s tím související vynalezení vysokotlakého čerpadla pracujícího s tlaky řádově ve stovkách MPa. Za největšího průkopníka v oblasti vodních paprsků je považován Dr. Norman Charles Franz, který již od roku 1950 intenzivně pracoval na výzkumu využití vodního paprsku jako řezného nástroje. Dr. Franz byl povoláním lesní inženýr, avšak pracoval na studii využití vysokého tlaku vody (UHP – ultrahigh pressure), kterého dosáhl tak, že na vysoký sloupec vody ve válci spouštěl těžká závaží. Veškerou vodu soustředil do úzké trysky a tím docílil impulsu vysokotlaké kapaliny, přičemž takto vzniklý proud vody byl schopen štípat dřevo či řezat měkké i poloměkké materiály. Vytvoření nepřetržitého paprsku bylo téměř nemožné, dokonce i životnost jeho zařízení byla měřena v minutách. Ačkoliv sám nikdy nevyrobil funkční stroj na řezání dřeva, který by se mohl komerčně uplatnit, jeho poznatky a výzkum významně přispěly k dalšímu vývoji technologie.

Největším příkladem je firma McCartney Manufacturing Company z Baxter Springs v Kansasu, pobočka společnosti Ingersoll Rand, která využila znalostí a poznatků výzkumu Dr. Franze a v roce 1971 vyrobila první komerční jednotku pro řezání dřeva. Tato jednotka dosahovala tlaku vody až 275 MPa při průtoku vody 6,3 l/min, což lze považovat za první komerčně dostupné vysokotlaké zařízení na světě. Podmínka dosažení vysokého tlaku (UHP – ultrahigh pressure) je definována tlakem větším než 30 000 liber na čtvereční palec (psi), což je přibližně 206,84 MPa [2, 5, 11].

V roce 1970 se na scéně s technologií vodních paprsků objevila společnost Flow, která vyvinula vysoce spolehlivá čerpadla s nepřetržitým provozem, což umožnilo další rozvoj. Stále však bylo možné využít vodní paprsek pouze pro řezání měkkých a středně měkkých materiálů. O překonání dalšího zásadního milníku ve vývoji řezání vodním paprskem se ve spojení se společností Flow postaral Dr. Mohamed Hashish. Dr. Hashish, studující na Concordia University v Montrealu, si kladl otázku, jak zlepšit řezné schopnosti vodních paprsků. V roce 1979 byl zaměstnán právě ve společnosti Flow, kde pracoval jako výzkumný pracovník a mohl rozvinout myšlenku zlepšit řezné vlastnosti vodního paprsku přidáním abrazivních částic do proudu vody. Experimentoval s různými abrazivními materiály, jako je minerální granát či běžný písek. V roce 1980 opravdu potvrdil svou teorii a ve spolupráci se společností Flow uvedl na trh technologii vodního paprsku s přídavkem abrazivních částic schopnou řezat materiály s vyšší pevností a větší tloušťkou, jako např. sklo, ocel či beton. Tlak vody u tohoto systému dosahoval hodnoty přibližně 380 MPa [1,5, 13].

V roce 1981 se ve Spojených státech amerických konalo vědecké sympozium zabývající se problematikou vodních paprsků, kde Dr. Mohamed Hashish ve spolupráci s Dr. J. Reichmanem a Dr. J. Cheungem představil článek DEVELOPMENT OF WATERJET-ASSISTED CABLE PLOW, který se zabýval vývojem kabelového pluhu s asistencí vodního paprsku. Následně ve spolupráci s Dr. Reichmanem a G. Yiem, uvedl na tomto sympoziu i 2. článek, s názvem THE APPLICATION OF WATERJET CUTTING TO UNDERGROUND UTILITIES INSTALLATION, kde se zabývá využitím paprsku v hornictví a aplikuje možnosti technologie představené v prvním článku [12].

V následujících letech se technologie abrazivního vodního paprsku začala postupně využívat také v mnoha jiných odvětvích, než v hornictví. Zejména v letectví, v potravinářství, v automobilovém či kosmickém průmyslu. Právě v kosmickém průmyslu

nastal obrovský pokrok v dělení materiálů, jelikož vesmírný program NASA potřeboval vyřešit problém s řezáním nových kompozitních keramických obkladů na bázi RCC (reinforced carbon-carbon) pro raketoplány řady X. Jako nejlepší řešení se ukázal právě usměrněný abrazivní vodní paprsek ve spojení s číslicově řízeným CNC systémem. V dalším období se firmy vyvíjející technologii vodních paprsků zaměřily na vznik inteligentního řezacího systému a vývoj stále výkonnějších tlakových čerpadel. V roce 1997 firma Flow představila vůbec první tlakové čerpadlo generující tlaky 670 MPa. Tato skutečnost oslovila další průmyslové firmy možnostmi využití vodního paprsku. V posledních letech se vývojové firmy díky tzv. dynamickému řízení vodního paprsku zaměřují spíše na přesnost řezu a optimalizaci geometrických parametrů obráběného materiálu [1, 2, 5].

O české zastoupení ve vývoji a rozvoji technologie vodních paprsků se v 80. letech 20. století zasloužil zejména prof. Jaroslav Vašek z Hornického ústavu ČSAV v Ostravě (v současnosti Ústav geoniky Akademie věd ČR), který prosazoval využití vodních paprsků zejména v uhelném hornictví a při těžbě nerostů. Jím založené pracoviště v Ostravě se problematikou vodních paprsků zabývá dodnes a je jedním z největších výzkumných center této technologie v Evropě.

V současnosti je technologie vodního paprsku rozšířená po celém světě a v zásadě existují dva základní typy vodních paprsků a to čistý vodní paprsek a abrazivní vodní paprsek. Oba typy paprsků budou v následujících částech mé práce podrobněji rozebrány [13].

2. Popis, charakteristika a zařazení technologie vodních paprsků

2.1. Nekonvenční technologie obrábění

V dnešní době již v mnoha případech klasické technologie nedokážou splnit očekávané požadavky na ekonomiku, výkonnost, kvalitu či velmi rozšířené nároky na ekologickou nezávadnost. Z toho důvodu v mnoha oblastech převážně strojírenského průmyslu nelze běžné konvenční technologie použít, zejména pro tvarově složitější a v konstrukci strojů stále častěji se objevující tzv. těžkoobrobitelné materiály (např. žárovečné a žárovzdorné oceli, keramické materiály, titanové či kompozitní slitiny, atd.). Proto se do popředí stále více dostávají nekonvenční neboli fyzikálně/chemické metody obrábění, kam se řadí i technologie vysokorychlostních vodních paprsků [17, 20].

Velmi jednoduše řečeno lze za nekonvenční technologie považovat takové technologie, které jsou alternativou k dnes již klasickým technologiím. U těchto metod se nepoužívá standardní řezný nástroj, u kterého lze definovat pracovní část a zároveň se neutváří klasické třísky typické pro konvenční třískové obrábění. K úběru materiálu se zde využívá elektrických, tepelných, chemických, ultrazvukových, abrazivních a jiných fyzikálních či chemických principů, případně jejich kombinace [17, 20].

Vlastnosti nekonvenčních technologií:

- materiál nástroje nemusí být tvrdší a pevnější než obráběný materiál,
- možnost komplexně obrábět i tvarově složité obrobky,
- možnost zavedení plné automatizace s využitím CAD/CAM systému,
- obrobitelnost téměř nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, ale na fyzikálně/chemických vlastnostech,
- působí minimální (nebo žádné) řezné síly,
- vysoká energetická náročnost,
- možnost obrábět s přesností až 1 μm,
- obrábění miniaturních obrobků [14, 17, 20].

2.2 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody obrábění lze rozdělit podle převládajícího typu vložené energie potřebné k dělení či obrábění materiálu do tří základních skupin [9, 20].

a) Metody založené na **tepelném či elektrotepelném** principu úběru materiálu:

- obrábění laserovým paprskem (LBM – Laser Beam Machining),
- obrábění plazmovým paprskem (PBM – Plasma Beam Machining, nebo PAM – Plasma Arc Machining),
- elektroerozivní obrábění (EDM – Electro Discharge Machining),
- obrábění paprskem elektronů (EBM – Electron Beam Machining),
- obrábění paprskem iontů (IBM – Ion Beam Machining).

b) Metody založené na **mechanickém** principu úběru materiálu:

- obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic Machining),
- obrábění paprskem vody (WJM – Water Jet Machining),
- obrábění abrazivním paprskem vody (AWJM – Abrasive Water Jet Machining),
- obrábění proudem brusiva (AFM – Abrasive Flow Machining),
- obrábění paprskem brusiva (AJM – Abrasive Jet Machining).

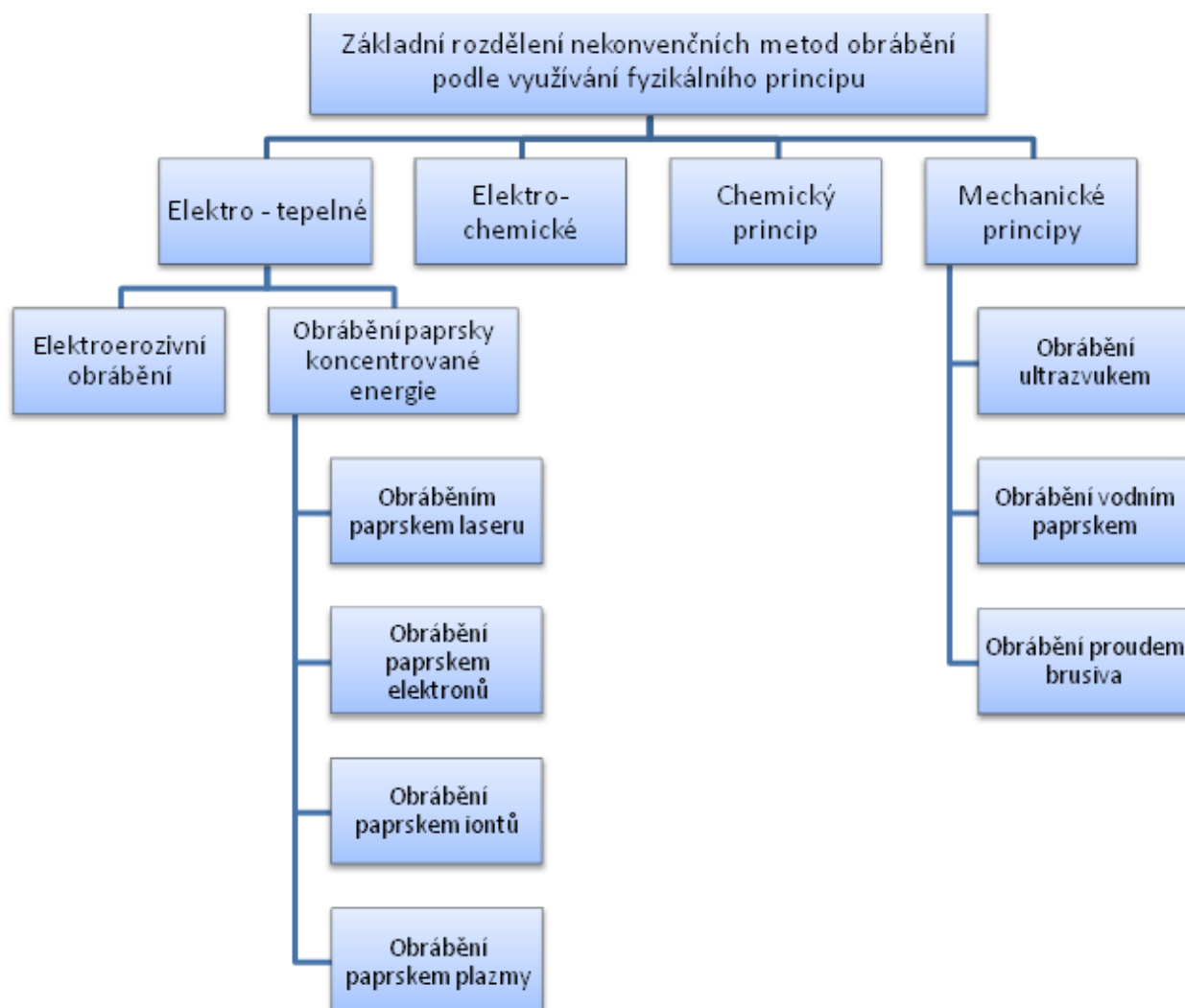
c) Metody založené na **chemickém nebo elektrochemickém** principu úběru materiálu:

- chemické obrábění (CM – Chemical Machining),
- elektrochemické obrábění (ECM – Electro Chemical Machining),
- fotochemické obrábění (PCM – Photochemical Machining) [6].

Obr. 2.1 uvádí schéma rozdělení nekonvenčních technologií obrábění podle použité literatury [20].

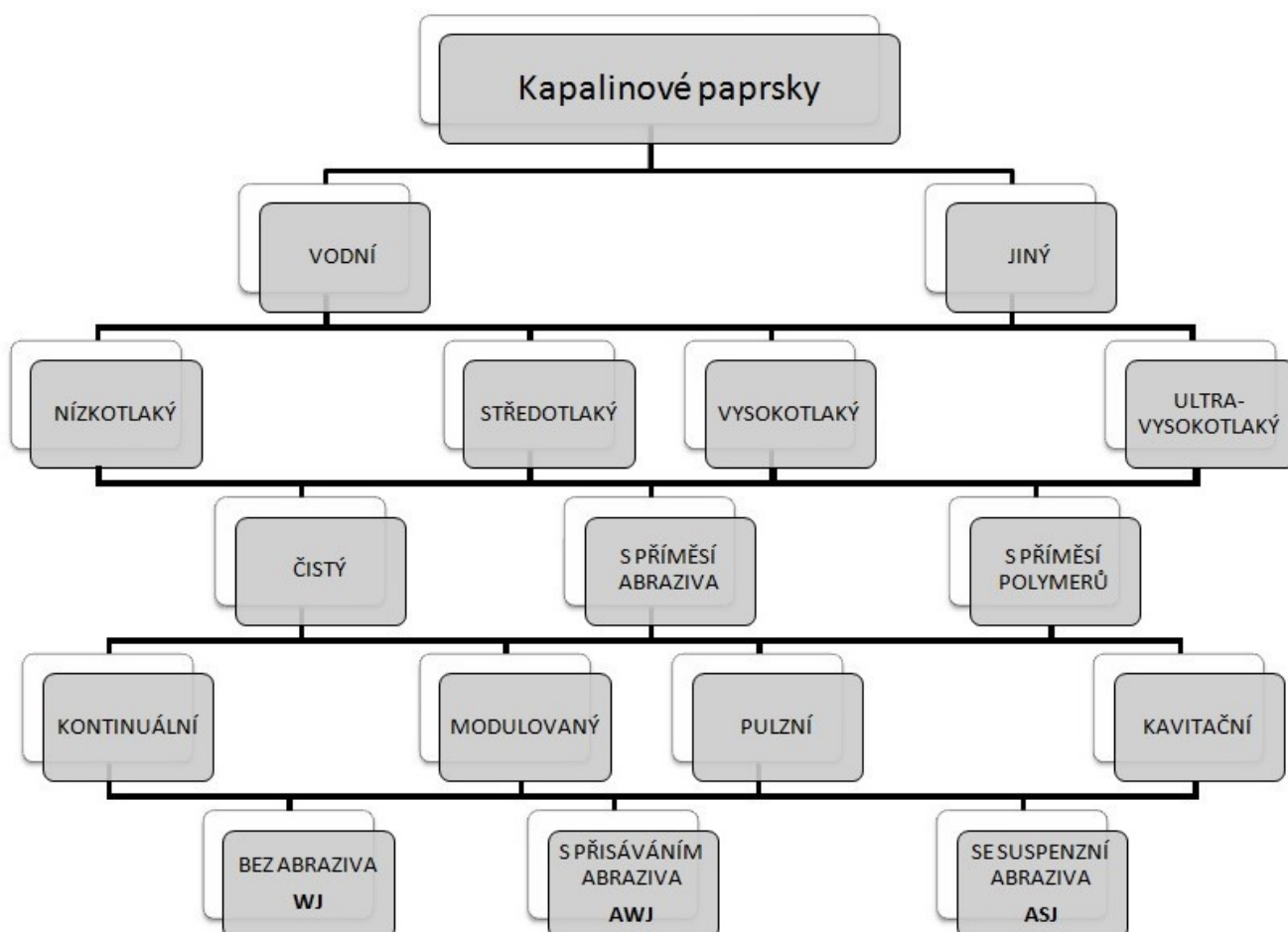
2.3 Rozdělení technologie vysokorychlostních vodních paprsků

Voda sama o sobě má chemické a mechanické vlastnosti, které ji činí užitečnou v mnoha oblastech. Během let studia a vývoje vodních paprsků pro potřeby řezání bylo vytvořeno mnoho různých typů a verzí vodních paprsků, přičemž se nejvíce osvědčily a v průmyslové praxi uplatnily zejména metody: Water Jet Machining (WJM), Abrasive Water Jet Machining (AWJM) a Abrasive Suspension Jet Machining (ASJM), které podrobněji rozebírám v dalších částech mé práce. Díky svým pozitivním vlastnostem, které uvádím na konci této kapitoly, je technologie vysokorychlostních vodních paprsků dnes již zcela běžná v nahrazování konvenčních technologií v mnoha odvětvích průmyslu [17, 22].



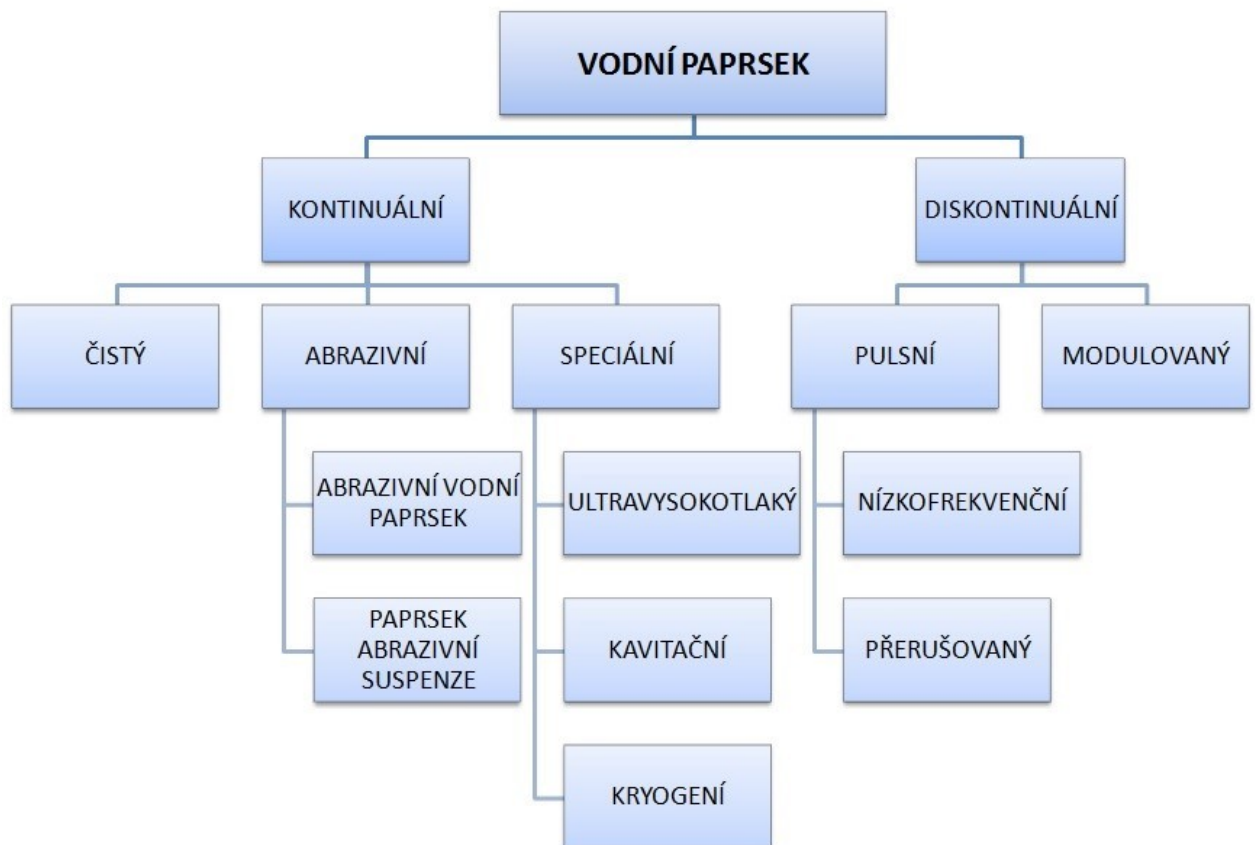
Obr. 2.1 Schematické rozdělení nekonvenčních metod obrábění [20].

Při řezání vodním paprskem dochází vlivem mechanicko-fyzikálního účinku k úběru materiálu. Při průchodu vysokotlaké vody vodní tryskou dochází k přeměně tlakové energie vody na kinetickou energii paprsku. Díky tomu působí úzký proud vody vysokou rychlostí (při tlaku vody pohybujícího se okolo 400 MPa mluvíme o rychlosti až 1000 m/s) a obrovskou kinetickou energií na obráběný materiál. Přidáním abrazivních částic do vodního proudu se mechanický účinek vodního paprsku mnohonásobně zvětší. Kapalinové paprsky se nejčastěji dělí podle typu použitého pracovního média, podle tlaku generovaného speciálními vysokotlakými čerpadly, podle druhů příměsí, podle chování vodního paprsku za tryskou a také podle způsobů dodávání abrazivních částic do vodního paprsku. Schematické rozdělení kapalinových paprsků je znázorněno na obr. 2.2 [2, 17, 22].



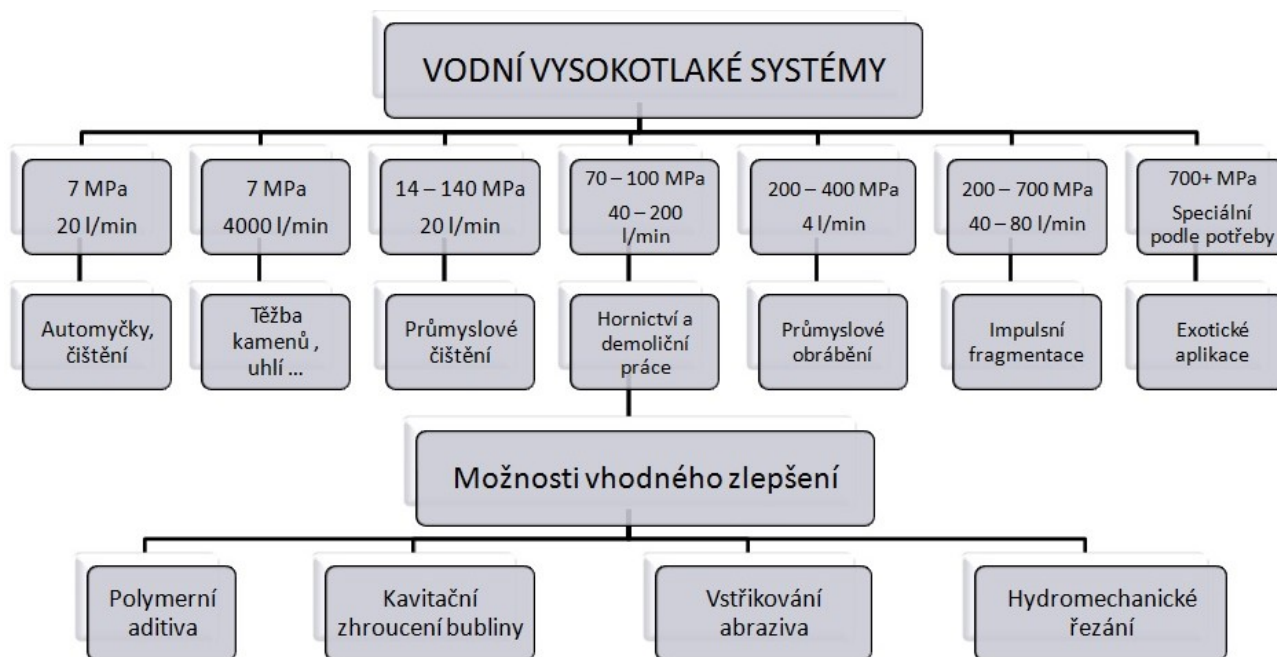
Obr. 2.2 Schematické rozdělení kapalinových paprsků [15].

Při experimentálním testování a různých měřeních se pro potřebu obrábění vodním paprskem zkoušela i jiná pracovní média než voda, avšak především díky snadné dostupnosti a nízké hodnotě viskozity se v praxi používají téměř výhradně vysokorychlostní vodní paprsky. Na obr. 2.3 je uvedeno schématické rozdělení vodních paprsků podle spojitosti výstupního paprsku [15].



Obr. 2.3 Schématické rozdělení vodních paprsků [6].

V případě využití vody jako primárního pracovního média je nejdůležitějším parametrem při určování možností komerčního využití tlak vody a průtok vody za jednotku času. Rozsah tlaků a průtoků využívaných v různých průmyslových odvětvích je znázorněn na obr. 2.4 [6].



Obr. 2.4 Aplikace vodních paprsků v závislosti na tlaku a průtoku [6].

2.3.1 Výhody a nevýhody technologie vodních paprsků

Vzhledem ke stále rostoucím investicím do technologického vývoje vodních paprsků a tím spojené vytváření nových možností uplatnění v průmyslu je patrné, že výhody zdaleka převyšují nevýhody u této progresivní nekonvenční technologie. Ačkoliv je technologie vysokorychlostních vodních paprsků stále samozřejmě i literárně považována za nekonvenční technologii stále více zdrojů ji již pomalu považuje za tak samozřejmou, že ji považují za konvenční technologii [3, 9, 22].

Mezi nejdůležitější přednosti lze zařadit:

- obrovská řezná univerzálnost od papíru přes kovy až po speciální pancíře při tloušťkách od 0,1 mm až po 400 mm,
- lze řezat měkké a lepkavé či dokonce droplivé se křehké materiály,
- bezprašná technologie,
- vysoká energetická účinnost dosahující až 85 %,
- studený řez (do 70 °C), takže je možné obrábět i materiály citlivé na teplo,

- možné řezání pod vodní hladinou,
- nevzniká teplem ovlivněná oblast, která by mohla negativně ovlivnit obrobek,
- obrobek není nutné nějak pevně upínat,
- malá ztráta materiálu zapříčiněná úzkým řezem,
- jediný řezný nástroj lze použít na frézování, gravírování, vrtání, řezání či soustružení,
- kvalitní řez bez otřepů,
- relativně rychlý proces řezání,
- snadné začlenění do automatizovaného provozu díky využití CNC řízení,
- proces řezání probíhá bez kontaktu nástroje s obrobkem,
- možnost použít jiné pracovní médium než vodu - zejména v potravinářském průmyslu (např. olej, tuky apod.),
- relativně velká pracovní plocha (rozdílná podle typu stoje),
- vysoce ekologická technologie,
- minimální zatížení obrobených ploch zbytkovým napětím,
- bez mikrotrhlin v oblasti řezu,
- při vhodně zvolených parametrech vysoká přesnost řezu (určujícím faktorem je tloušťka materiálu), což prakticky eliminuje potřebu druhotných zpracování,
- možnost řezat tvarově složité tvary i v mikro rozměrech díky např. 2,5D řezací hlavě řízené v pěti osách,
- relativně dlouhá životnost trysek [u metody WJ (vodní tryska) 500 - 1000 hodin, u AWJ (zaostřovací trubice) zhruba 100 hodin a u ASJ (suspenzní tryska) asi 15 hodin],
- řezání bez omezení směrů či úkosů,
- použití v otevřeném prostoru bez znečištění životního prostředí, při dodržení bezpečnostních pravidel lze eliminovat také přímé zdravotní ohrožení,
- poměrně nízké náklady na údržbu [9, 19, 22].

Mezi nejdůležitější nedostatky řadíme:

- velká hlučnost sestavy,
- nevyhnutelný kontakt obrobku s vodou či jiným pracovním médiem,
- vysoké nároky na čisté pracovní médium,
- u materiálů náchylných k nasáknutí velmi dlouhé vysoušení,

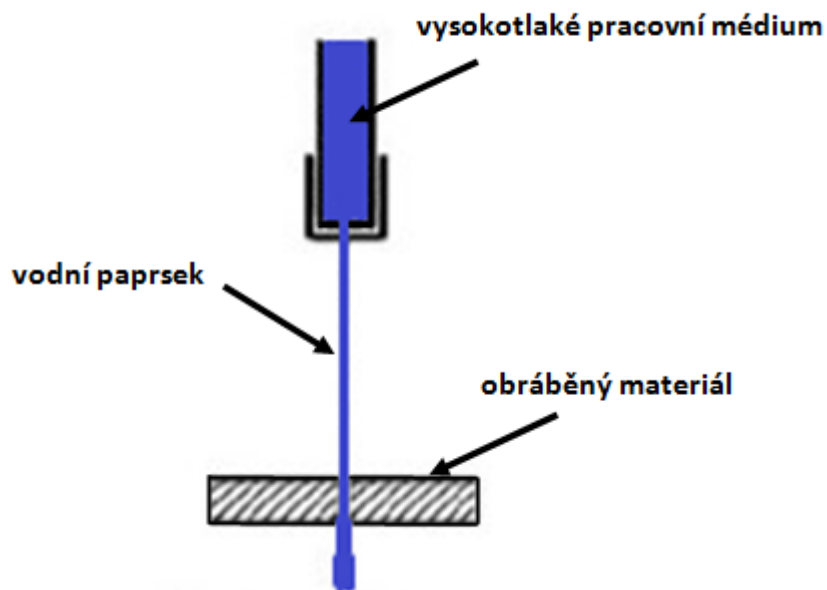
- poměrně vysoká pořizovací cena stroje,
- opracovávané materiály musí být schopné snášet vlastnosti pracovního média,
- povrchy některých obráběných materiálů náchylných na korozi je nutné ošetřit,
- u materiálů s relativně velkou tloušťkou, se již na spodní straně řezu objevuje značná nepřesnost, záleží ovšem na tvrdosti materiálů a nastavených řezných parametrech, z nichž nejdůležitější je řezná rychlost,
- téměř nemožné řezat materiály, u kterých dochází k porušení vnitřního mechanického předpětí (typickým příkladem je kalené sklo),
- cena abraziva [9, 10, 22].

2.4 Technologie WJM (Water Jet Machining)

Je původní metoda využívající usměrněný vodní paprsek. Metoda označená jako WJM (Water Jet Machining) je charakteristická tím, že pro potřeby obrábění využívá pouze běžnou čistou vodu o vysokém tlaku (pracovní tlak se pohybuje v rozmezí 50 – 650 MPa) filtrací zbavenou škodlivých minerálů a usazenin. Vysokotlaká voda následně prochází vodní tryskou o průměru obvykle do 0,4 mm (podle aplikace) a tím utvoří velmi úzký, čistý vodní paprskem s obrovskou kinetickou energií, který je schopen postupně mechanicky narušovat obráběný materiál. Takto utvořený paprsek lze použít pro dělení primárně nekovových materiálů či méně houževnatých materiálů jako je papír, lepenka, lamináty, potraviny, lino, guma, pryž, apod. Rychlost řezání se může pohybovat v závislosti na obráběném materiálu a jeho tloušťce v rozsahu několika mm/min (tenké kovy) až po stovky m/min (lepenka, potraviny, papír).

Rychlost proudění kapaliny se pohybuje v rozmezí 600 až 1000 m/s. Metody vodních paprsků jsou charakteristické svojí dobrou energetickou účinností, což platí i pro metodu WJM. Energetická účinnost může dosáhnout až 85 %. Pro porovnání energetická účinnost při obrábění paprskem laseru se pohybuje kolem 10 %. Přesnost výsledného řezu je u obrobků do tloušťky 10 mm \pm 0,1 mm. Co se týče materiálů s větší tloušťkou než 10 mm, pak se pohybujeme okolo \pm 0,2 mm na metr řezu, přičemž technologií WJM se dají dělit měkké materiály přibližně do tloušťky 100 mm. Zjednodušené schéma principu technologie WJM je znázorněno na obr. 2.5.

Nejdůležitější komponenty jako např. vysokotlaké čerpadlo, řezací hlava či tryska, které zajišťují u technologie WJM funkčnost systému jsou podrobně rozebrané ve třetí kapitole mé práce [2, 5, 6, 13].



Obr. 2.5 Znázornění čistého vodního paprsku [23].

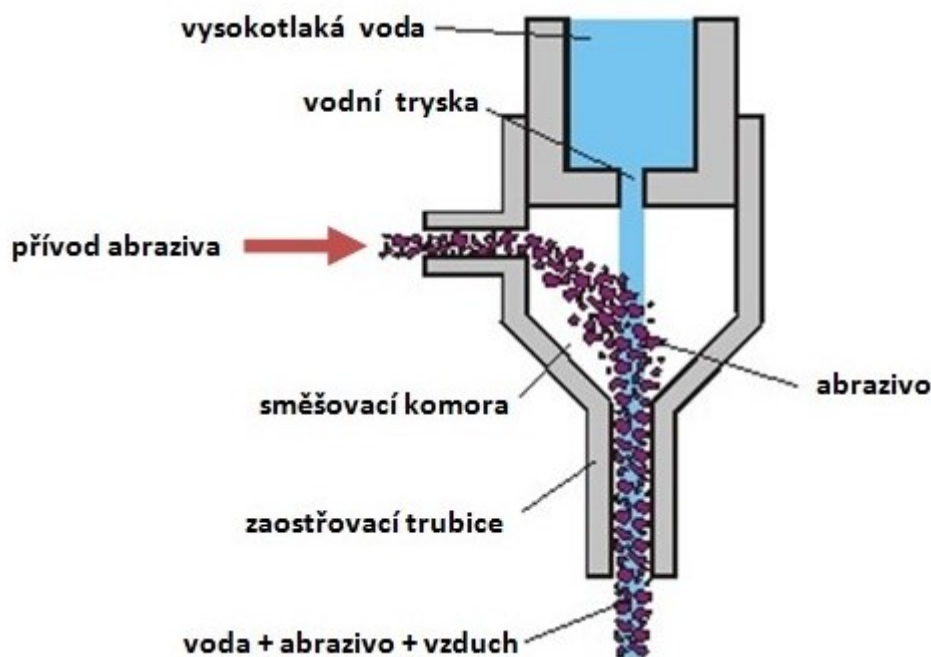
2.5 Technologie AWJM (Abrasive Water Jet Machining)

Technologie AWJM a WJM patří v dnešní době mezi nejrozšířenější metody kapalinových paprsků v praxi. Princip AWJM je obdobný již zmíněné technologii WJM, avšak s tím rozdílem že využívá rychlost proudění proudu vody při průchodu tryskou k vytvoření podtlaku ve směšovací komoře, díky čemuž se k vysokorychlostnímu proudu vody přisává vzduch a abrazivo, které je přesně dávkováno do směšovací komory ze zásobníku. Abrazivo se smíchá s proudem vody a utvoří abrazivní vodní paprsek, který se následně usměrní v tzv. zaostřovací trubici (viz obr. 2.6). Samotná technologie je založena na principu urychlení abrazivních částic, protože materiál je pro dosažení požadovaného erozního efektu porušován nikoli primárně pracovním médiem, jak je tomu u technologie WJM, nýbrž urychlenými abrazivními částicemi.

Takto vzniklý paprsek je tedy tříložkový skládající se z vody, vzduchu a abraziva, přičemž při dopadu na obrobek má mnohonásobně větší erozivní účinek než čistý paprsek. Avšak nedokonalé promíchávání ve směšovací komoře má za následek snížení řezné účinnosti či jiná negativa spojená s nerovnoměrným opotřebením zaostřovací trubice.

Z toho důvodu vývojová centra stále na této problematice pracují, aby se dosáhlo co možná nejlepšího promíchání pracovního média s abrazivem [2, 6, 13, 19, 22].

Výsledného procesu porušování materiálu se u této metody účastní čtyři mechanismy. Tyto mechanismy jsou řezání, únavové porušení, křehký lom a tavení, přičemž tyto metody většinou nepracují samostatně, ale v kombinaci. Abrazivní vodní paprsek je díky velkému mechanickému účinku způsobenému přidáním abraziva schopen obrábět i těžkoobrobitelné materiály [1, 19, 21, 22].

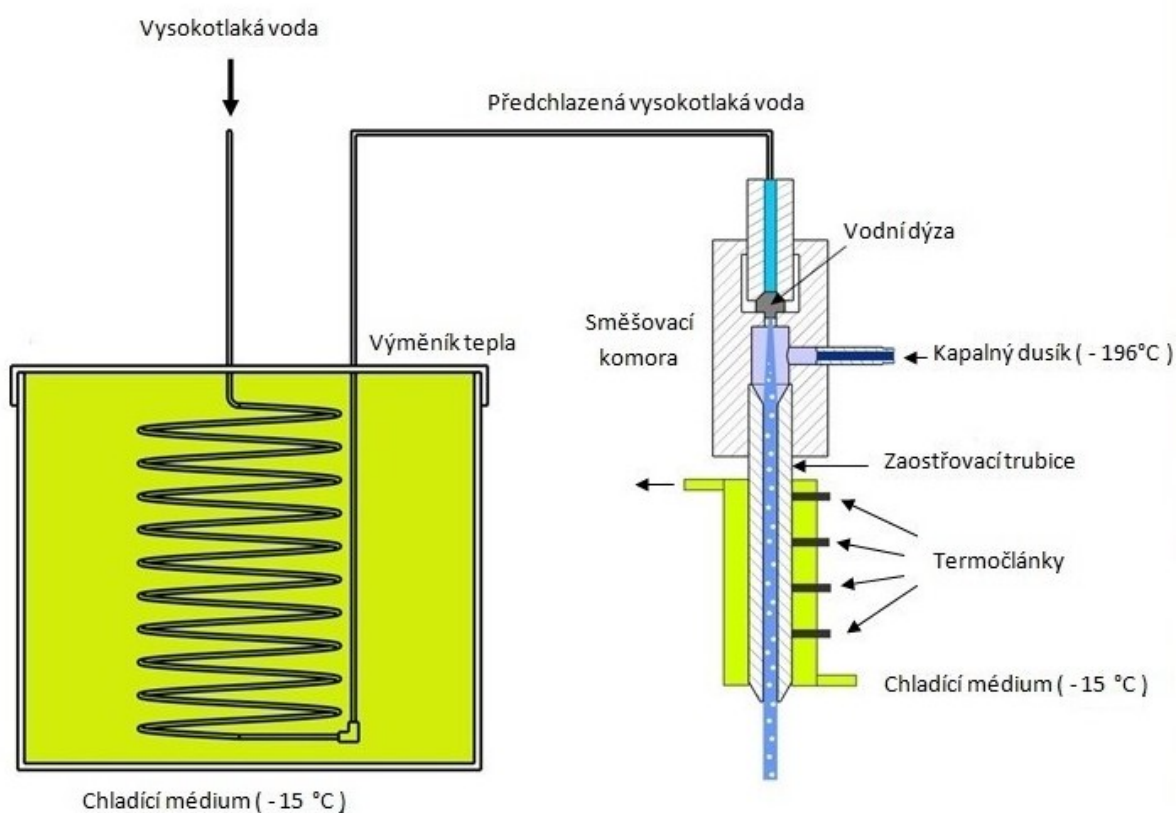


Obr. 2.6 Schematické znázornění technologie AWJM [5].

Výstupní průměr zaostřovací trubice je zpravidla větší než u technologie WJM, přičemž nejčastější průměry jsou v rozmezí od 0,75 mm do 2,5 mm. Rychlost proudění pracovního média dosahuje rychlostí 600 m/s až 1100 m/s při pracovním tlaku 250 MPa – 600 MPa. Průměr paprsku více méně odpovídá průměru zaostřovací trubice a nabývá tudíž hodnot od 0,75 mm do 2,5 mm. Vzdálenost mezi koncem zaostřovací trubice a obrobkem se udržuje co nejkratší, ideálně 2 mm, obvykle však kolem 4 mm z důvodu manipulace a přejezdu řezné hlavy nad obrobkem [17, 20].

2.6 Technologie IJM (Ice Jet Machining)

Technologie IJM byla vyvinutá v 90. letech 20. století na akademické půdě Institute of Technology New Jersey v USA. Metoda pracuje s řeznou směsí ve formě ledových krystalů, které ovšem nemají takovou tvrdost, jako abrazivo používané u technologie AWJM (například granát), což vede k menší účinnosti procesu. Díky poměrně nízkým nákladům na abrazivní materiál, ale zejména ekologičnosti a zdravotní nezávadnosti je však tato metoda široce využívána v potravinářském průmyslu. Schematické znázornění s popisem komponentů je pro přehlednost znázorněno na obr. 2.7 [17, 18].



Obr. 2.7 Technologie IJM [18].

2.7 Technologie DWJ (Dynamic Water Jet)

Nejedná se o samostatný typ paprsku, ale specifický systém pohybu abrazivní řezné hlavice k eliminaci některých negativních vlastností abrazivního vodního paprsku. Než přistoupíme k vlastnímu obráběcímu procesu, je potřeba jasně stanovit nároky na požadovanou výslednou kvalitu povrchu. Dopadající vodní paprsek svírá s obrobkem běžně při konvenčních metodách obrábění pravý úhel, přičemž vlivem mírně se rozšiřujícího paprsku dochází k tvorbě úkosu. Při řezání těžkoobrobitelných materiálů lze

na řezné ploše nejlépe demonstrovat rozdělení trajektorií paprsku na dvě oblasti. Tyto oblasti vznikají z důvodu slábnutí energie paprsku se zvětšující se hloubkou řezu v obrobku. První oblast je tzv. hladká, zde se paprsek ještě neohýbá, ovšem se snižující se kinetickou energií paprsku přecházíme do oblasti rýh. V této oblasti je již paprsek částečně rozpadlý a dochází ke geometrickým vadám, které jsou viditelné pouhým okem (viz obr. 2.8). U technologií vodních paprsků určují jakost povrchu tzv. stupně kvality, které se značí od hrubého dělicího řezu Q1 až po nejkvalitnější Q5, přičemž s rostoucí rychlostí pohybu řezací hlavy jakost klesá [13, 15, 23, 31].



Obr. 2.8 Přehled stupňů kvality řezu [23].

Systém DWJ byl vyvinut společností Flow právě pro vyřešení problematiky kvality povrchu v místě řezu a to jak z ekonomické tak i technické stránky. Před zavedením metody DWJ bylo nezbytné rychlost řezací hlavy držet na minimální hodnotě, pokud byla požadována vysoká jakost, což ovšem vedlo k nízké produktivitě. Základním principem této technologie je skutečnost, že řezací hlava je umístěna na speciálně zkonstruované kloubové hlavici, která umožňuje náklon ve všech směrech až do rozsahu 60°. Pohyb hlavice řídí unikátní matematický model schopný sledovat vzor obrysu a měnit úhel naklonění podle potřeby. Takto zkonstruovaný model je schopen eliminovat vznik ohybů paprsku a zabránit tvorbě úkosů. Díky této technologické inovaci si můžeme dovolit využít vyšších řezných rychlostí s požadovanou jakostí, což vede k vyšší produktivitě. Vodní paprsek se systémem DWJ se velice rychle rozšiřuje, využití nachází např. při výrobě

nástrojů, forem a přesných součástí pro letecký průmysl. Dokonce stále častěji nahrazuje laserovou či elektroerozivní drátovou metodu [1, 13].

Výhody DWJ:

- rychlost řezání materiálu je vyšší než u běžných zařízení AWJM či WJM,
- eliminace dokončovacích prací,
- snížení nákladů na jeden kus v ideálním případě až o 75 %,
- vysoká geometrická přesnost,
- snadné ovládání [1, 6, 13].

Pro představu, cena standardního komerčního stroje Mach3 s technologií DWJ od společnosti Flow se pohybuje okolo 5 200 000 Kč [1].

2.8 Technologie pulzních paprsků

Ačkoliv je technologie vodních paprsků v dnešní době velmi rozšířená díky svým nesporným výhodám, stále se rozvíjí a zdokonaluje. Jedním ze směrů, jak dosáhnou zvýšení účinnosti, je zavedení přídavné energie do paprsku a využití impaktního tlaku generovaného dopadem pulzního paprsku. Tyto paprsky řadíme do kategorie diskontinuálních, protože jsou charakteristické nekonstantní hodnotou dodávané energie po dobu trvání řezného procesu.

Lze dokázat, že při stejných vstupních parametrech je dopadem sloupce kapaliny generovaný impaktní tlak p_i několikanásobně vyšší, než odpovídající stagnační tlak p_s generovaný dopadem kontinuálního paprsku. Tlakový poměr jde poté matematicky vyjádřit jako:

$$\frac{p_i}{p_s} = \frac{2 C_0}{V_0} \quad (1)$$

Kde p_i je tlak impaktní, p_s je tlak stagnační, C_0 je rychlost zvuku v pracovním médiu a V_0 je rychlost proudění paprsku [5, 6, 17, 24, 25].

Podle způsobu generování lze pulzní paprsky rozdělit do tří základních skupin:

- Jednotlivé pulzy nebo též nízkofrekvenční pulzy,
- pulzní přerušovaný,

- pulzní modulovaný.

Jednotlivé pulzy nebo též nízkofrekvenční pulzy: jednotlivé pulzy dopadají na obráběnou plochu, kde produkují impaktní tlak, který se po časové prodlevě vyrovnává s tlakem stagnačním. Po dokončení jednoho pulzu poklesne tlak v místě dopadu sloupce kapaliny na nulu. Tento proces rychlého cyklického zatěžování dopadové plochy se opakuje s frekvencí odpovídající generování pulzace. Materiál je tedy narušován vlivem smykového a únavového namáhání v materiálu. Tento pulzační paprsek je nejčastěji vytvářen pomocí tzv. zařízení vytlačující pulzy tlakem. Vlivem extrémních změn reakčních sil a vysokého namáhání od hydraulického rázu je použitelnost tohoto způsobu generování velmi limitovaná [6, 25].

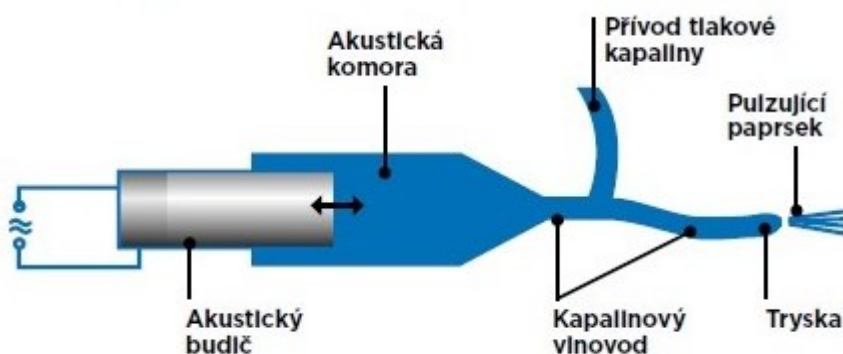
Pulzní přerušovaný: při tomto typu vychází vodní paprsek z trysky jako kontinuální, avšak hned za výstupem z trysky je periodicky pomocí laseru či perforovaných rotujících kotoučů sloupec vody rozčleněn a začíná se chovat jako pulzační. Velikou nevýhodou je skutečnost, že vlivem přerušování dochází ke ztrátě části energie obsažené v kontinuálním sloupci vody, a proto je u tohoto typu generování pulzních paprsků nízká účinnost. K narušení materiálu dochází periodicky s frekvencí odpovídající přerušování paprsku [6, 17, 25].

Pulzní modulovaný: díky své jednoduchosti a praktičnosti je tato metoda generování paprsku nejperspektivnější. U této metody dochází k velkým a rychlým tlakovým pulzacím ve vysokotlakém systému ještě před výstupem vody z trysky, což znamená, že z trysky následně vychází modulovaný paprsek jako kontinuální ale s proměnnou axiální rychlostí, která je cyklicky modulovaná v čase. Vlivem rozpadu kontinuálního proudu na shluky vody v určité vzdálenosti od trysky se paprsek mění na tzv. pulzující. Výhoda takového paprsku v porovnání s běžným kontinuálním spočívá v tom, že dopad každého shluku vody pulzujícího paprsku vyvolá v místě dopadu impaktní tlak, který několikanásobně převyšuje stagnační tlak, kterým působí na dopadovou plochu běžný kontinuální paprsek za jinak naprosto shodných pracovních podmínek. Avšak účinnost modulovaného paprsku závisí na efektivní vzdálenosti obráběného materiálu od trysky. Při generování paprsku touto metodou nedochází k extrémním změnám reakčních sil ani k hydraulickému namáhání. Také je eliminována ztráta energie, jak tomu bylo u pulzní metody přerušování.

Tento způsob dokáže generovat paprsek s hodnotou frekvencí v desítkách tisíc pulzů za sekundu, z čehož plyne velice intenzivní únavové narušení materiálu. Při použití

pulzujícího paprsku pro ošetření betonových povrchů při tlaku vody (cca 30 MPa – 70 MPa) dosáhneme stejných desintegračních účinků jako u standardních vysokotlakých zařízení při tlaku vody (cca 150 MPa – 200 MPa). Abychom dosáhli vytvoření shluků kapaliny, při vysoké frekvenci, navíc v prostředí o relativně vysokém tlaku, využívá se pro generování ultrazvuková modulace, která se po létech vývoje ukázala pro modulaci jako nejlepší řešení [17, 24, 25].

Jeden z možných způsobů generování pulzujícího paprsku je využití tzv. akustického budiče, který generuje tlakové pulzace do akustické komory naplněné kapalinou, přičemž pulzace se přenáší kapalinovým vlnovodem do trysky, kde se mění na pulzace rychlostní.



Obr. 2.9 Princip generování pulzujícího vodního paprsku [28].

Technologie pulzních paprsků je stále předmětem výzkumu a vývoje. Ústav geoniky AV ČR v Ostravě studuje problematiku pulzujících paprsků a jejich desintegrační účinků na materiálech již více než 20 let. V průběhu těchto let Ústav geoniky AV ČR provedl mnoho laboratorních experimentů s pulzujícími paprsky v oblasti stavebních hmot, zejména betonů různých fyzikálně-mechanických vlastností. Experimenty nejčastěji zkoumaly účinnost desintegrace pulzujícího paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem [26, 27].

2.9 Technologie ASJM (Abrasive Suspension Jet Machining)

Technologie ASJM je systém využívající jiného principu směšování abraziva s pracovním médiem než technologie AWJM. Výstupní abrazivní paprsek nazýváme suspenzí, protože abrazivo s pracovním médiem (vodou) vytvoří ve vysokotlaké nádobě řeznou směs udržovanou v suspenzi (disperzní soustavě tvořené pevnými částicemi rozptýlenými v kapalném prostředí). Řezná směs je následně pod vysokým tlakem vedena do speciální

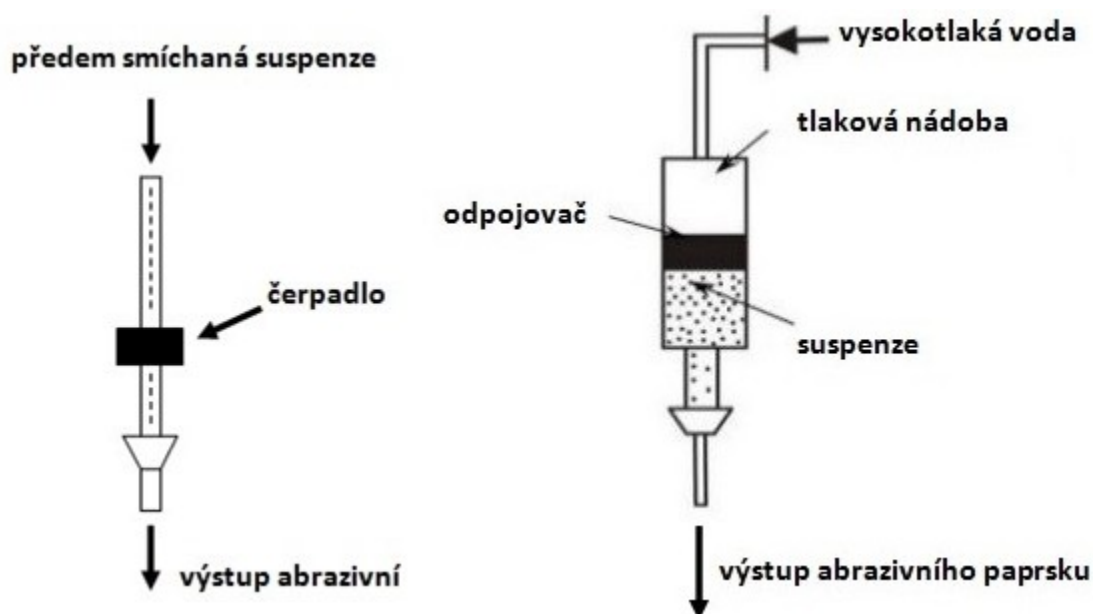
trysky, která musí splňovat vysoké nároky proti opotřebení. Z důvodu utváření suspenze před průchodem tryskou plyne, že u této technologie je výsledný abrazivní paprsek dvousložkový složený z pracovního média a abraziva bez přítomnosti vzduchu, který byl součástí výsledného paprsku u technologie AWJM. Důvod proč vůbec vývoj vodních paprsků směřoval tímto směrem je skutečnost, že u technologie AWJM dochází k nedokonalému promíchání abraziva s proudem vody ve směšovací komoře, a tím nevyužití potenciálu energetické hustoty. Technologie ASJM běžně využívá pracovní tlak do 200 MPa, ovšem nutno podotknout, že i při tomto pracovním tlaku dokáže vytvořit abrazivní paprsek srovnatelný svými abrazivními účinky s paprsky, které jsou generované metodou AWJM při pracovních tlacích kolem 400 MPa. Pro vývojové účely existují i zařízení s pracovním tlakem přesahujícím 250 MPa. Vzhledem k tomu, že do speciální trysky vstupuje pod vysokým tlakem již utvořená suspenze, můžeme použít menší průměr trysky a tím se zmenší i samotná šířka výsledného paprsku, což vede k větší přesnosti. Samotnou řeznou směs je nutné udržovat v suspenzi, přičemž suspenze vyžaduje periodické míchání a přes nízkotlaký okruh přesné doplňování velké tlakové nádoby z násypky [2, 4, 6, 17, 21].

U technologie ASJM existují 3 typy generování abrazivního suspenzního paprsku:

- **Direct pumping – metoda přímého čerpání** (obr. 2.10 vlevo). Při této metodě dochází k mísení pracovního média s abrazivem za atmosférického tlaku. Suspenze je následně pomocí vysokotlakého čerpadla dopravena do řezací hlavy, kde po průchodu tryskou vzniká již abrazivní paprsek s dostatečným erozním účinkem. Ačkoliv se jedná o technologicky a konstrukčně velice jednoduchou metodu, z důvodu extrémně vysokého opotřebení čerpadla při natlakování suspenze je z ekonomické stránky tento způsob generování paprsku naprosto nevhodný, proto se tento způsob mísení téměř nepoužívá [4].
- **Indirect pumping – metoda nepřímého čerpání** (obr. 2.10 vpravo). U této metody je vysokotlaká kapalina dopravována do tlakové nádoby pod vysokým tlakem. Pracovní médium působí na píst, přičemž takto vytvořeným tlakem tlačí již připravenou suspenzi do řezací hlavy. U této metody je důležité udržet stabilizaci suspenze, pro tyto účely se využívá vysoce koncentrovaný roztok polymeru s několikanásobně vyšší viskozitou než voda. Nevýhodou generování abrazivního paprsku

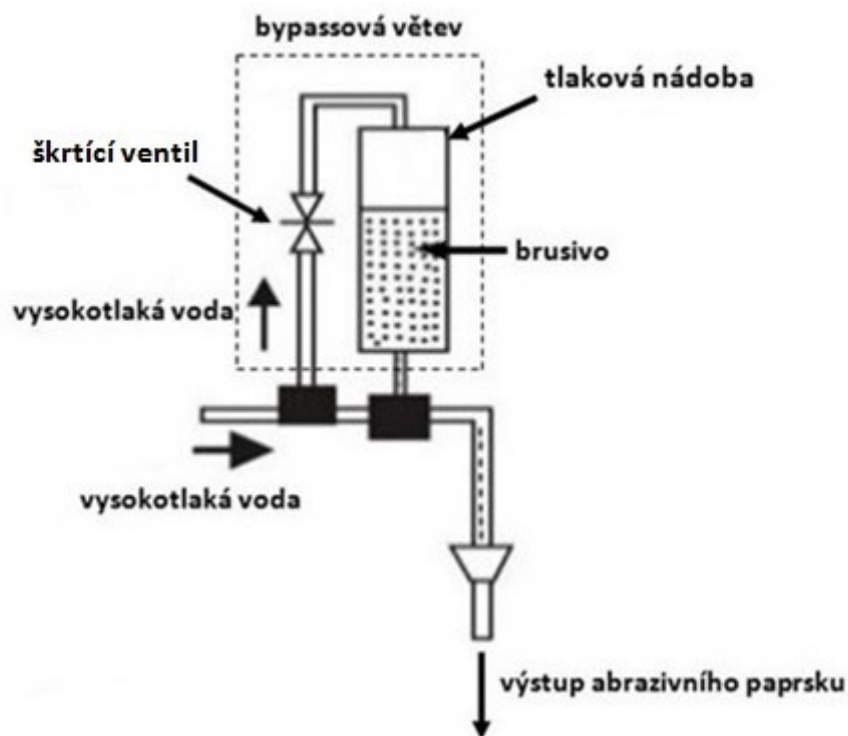
touto metodou je zejména omezený objem tlakové nádoby a tudíž s tím související řezný čas. Mimoto dochází také k rychlému opotřebení trysky, pístu a ventilů [4].

- **Bypass principle – obtoková metoda** (obr. 2.11). U této metody se vysokotlaký proud čisté vody přiváděný z čerpadla rozděluje do dvou větví. V tzv. bypassové větvi, kterou reguluje škrtkovací ventil, se proud vody dostává do tlakové nádoby, která je plná čistého abraziva. V tlakové nádobě dochází k mísení vody s abrazivem a vzniká suspenze, která za pomoci impulzní výměny pokračuje z tlakové nádoby do směšovací buňky, ve které dochází k mísení s hlavním proudem a vytvoření řezné směsi. Tato řezná směs po průchodu tryskou v řezací hlavě má již dostatečný erozní účinek pro obrábění. U této metody nedochází k tak intenzivnímu opotřebení komponentů, jako tomu bylo u dvou předchozích metod generování abrazivního paprsku. Nevýhodou je omezený objem tlakové nádoby, ve které je čisté abrazivo [4].



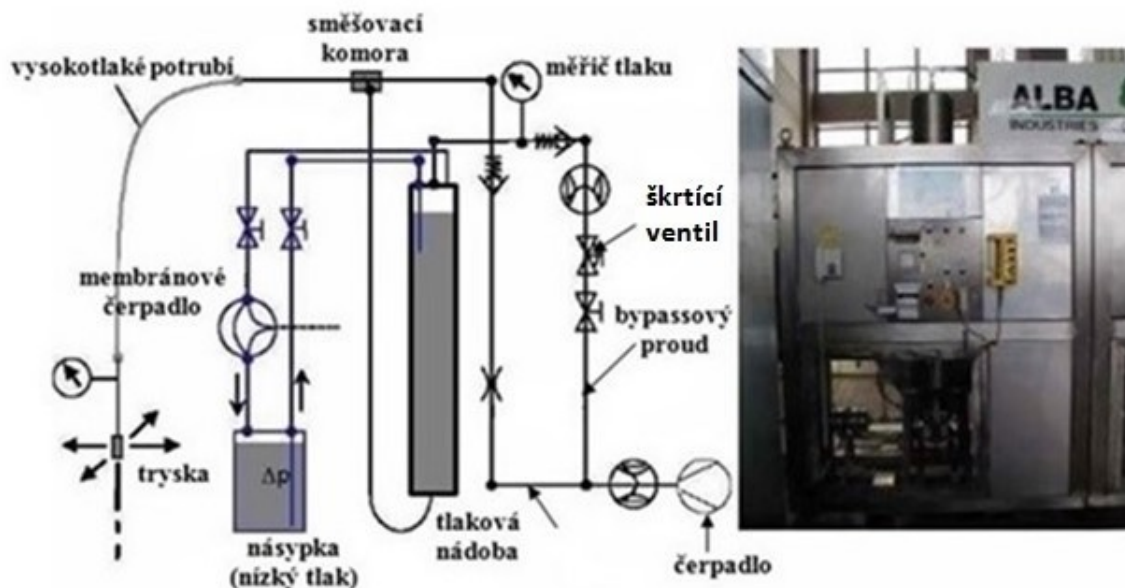
Obr. 2.10 Schematické znázornění metody Direct a Indirect pumping [2].

Nejdůležitější charakteristiky těchto mechanismů jsou rozsahy pracovních tlaků, jelikož systémy generované bypass okruhem jsou limitované pro tlaky do 200 MPa, oproti tomu metody generování paprsku pomocí přímého vstřikování mohou pracovat s tlaky až do 350 MPa [1, 4].



Obr. 2.11 Schematické znázornění metody Bypass principle [2].

Vzhledem k přijatelnému opotřebení komponentů a schopnosti dosáhnout relativně dlouhých řezných časů se v průmyslové aplikaci využívá generování suspenzního paprsku převážně metodou Bypass principle. Výhodou této metody je možnost regulace abrazivního hmotnostního průtoku v suspenzi díky tzv. škrťacímu ventilu, který se nachází v bypass větví. Pro názornost uvádím obr. 2.12, který znázorňuje komerční jednotku využívající skutečnost, že pomocí násypky lze nízkotlakým okruhem přivést abrazivo do tlakové nádoby během provozu [4, 37].

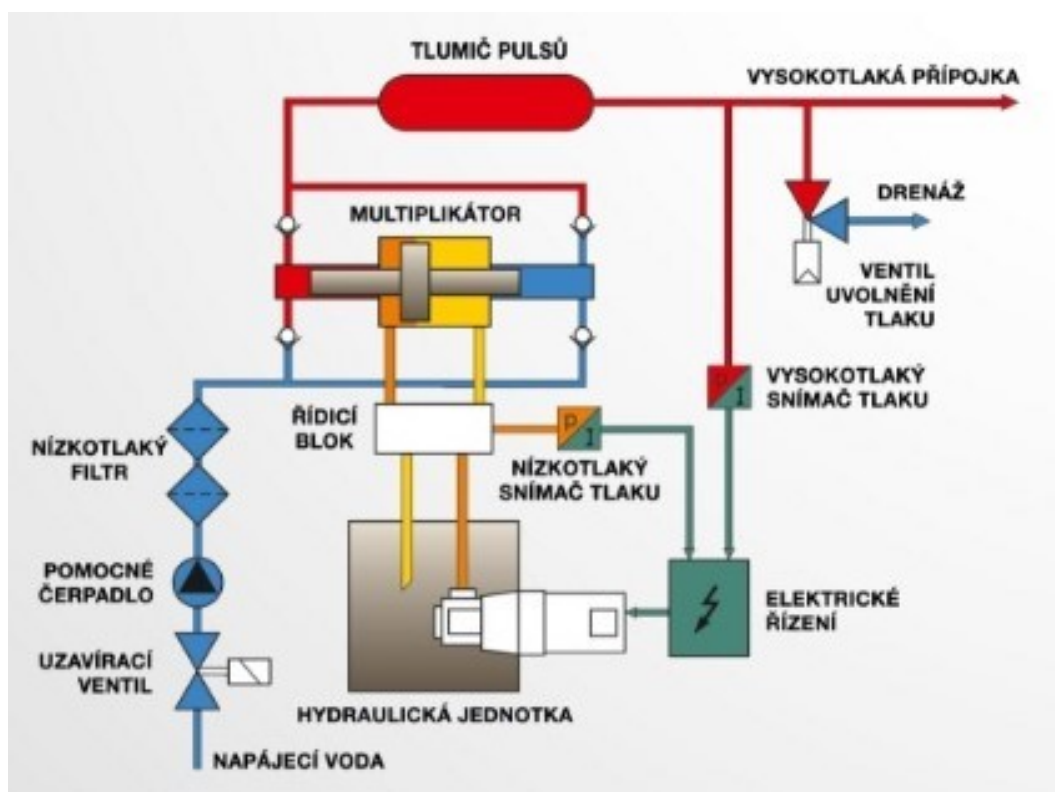


Obr. 2.12 Komerční zařízení pro technologii ASJM [4].

3. Hlavní komponenty systému pro technologie vodních paprsků

3.1 Vysokotlaká čerpadla

Abychom vůbec mohli mluvit o vysokorychlostním vodním paprsku, je potřeba splnit základní předpoklad, kterým je dosažení určitého minimálního tlaku pracovní kapaliny schopné vyvinout takovou kinetickou energii, která dokáže dostatečně narušit obráběný materiál. Tento předpoklad zajišťuje právě vysokotlaké čerpadlo. Pro generování vysokých tlaků se v zásadě používají dva typy zařízení a to vysokotlaké čerpadlo s multiplikátorem schopné generování tlaků až 700 MPa a vysokotlaké čerpadlo s triplexovým plunžrem schopné generovat tlaky do 300 MPa. Na obr. 3.1 můžeme schematicky vidět generování vysokotlakové kapaliny za pomoci vysokotlakého čerpadla s multiplikátorem [6, 9, 17].



Obr. 3.1 Schematické znázornění vysokotlakého čerpadla s multiplikátorem [8].

Ačkoliv je na trhu k dispozici mnoho druhů vysokotlakých čerpadel lišících se podle potřeby zákazníka převážně generovaným pracovním tlakem a průtokem za jednotku času, principiálně si jsou velmi podobná. Mezi nejdůležitější části vysokotlakého čerpadla řadíme – hydraulické čerpadlo, elektromotor, multiplikátor nebo triplexový plunžr a akumulátor tlaku (tlumič pulsů) [6].

Celé hydraulické zařízení s multiplikátorem znázorněné na obr. 3.1 generující požadovaný tlak lze rozdělit na dva řídicí okruhy:

- primární olejový okruh (nízkotlaký),
- sekundární vodní okruh (vysokotlaký).

Primární olejový okruh (nízkotlaký)

Primární nízkotlaký olejový okruh se skládá ze tří hlavní částí – hydraulického čerpadla, multiplikátoru a nádrže na olej. Elektromotor o určitém elektrickém příkonu v řádech desítek kW pohání hydraulické čerpadlo, které stlačí olej až na 20 MPa a přivádí jej do multiplikátoru. Multiplikátor tlak mnohonásobně zvětší a přes vysokotlaké potrubí převede z primárního okruhu do sekundárního. Přičemž platí, že primární nízkotlaký olejový okruh řídí sekundární vysokotlaký okruh pomocí tlaku řídicí kapaliny vytvářeného v hydraulické jednotce [20].

Sekundární vodní okruh (vysokotlaký)

Mezi základní prvky sekundárního vysokotlakého vodního okruhu lze zařadit – multiplikátor, akumulátor neboli tlumič pulzů, nízkotlaké a vysokotlaké filtrační jednotky. Provozní kapalina prochází nízkotlakým filtračním systémem, jehož primární funkcí je odstranit nečistoty už od velikosti 0,5 μm , dále se pomocí zpětných ventilů dostává pracovní médium do multiplikátoru. Vycházíme-li z Pascalova zákona, v multiplikátoru se tlak pracovního média několikanásobně zvětší (viz kapitola 3.2). Tato provozní kapalina o vysokém tlaku se přes systém zpětných ventilů dostává do akumulátoru, v němž se ztlumí hydraulické rázy, a neutralizuje se kolísání tlaku vyvolaného multiplikátorem. Po výstupu z akumulátoru přes vysokotlakou filtrační jednotku a vysokotlaké potrubí již vedeme pracovní médium do řezací hlavy [20].

Pro názornost je na obr. 3.2 znázorněno reálné vysokotlaké zařízení s multiplikátorem od společnosti BFT (Best Fluid Technology) typu 40.37 [8].

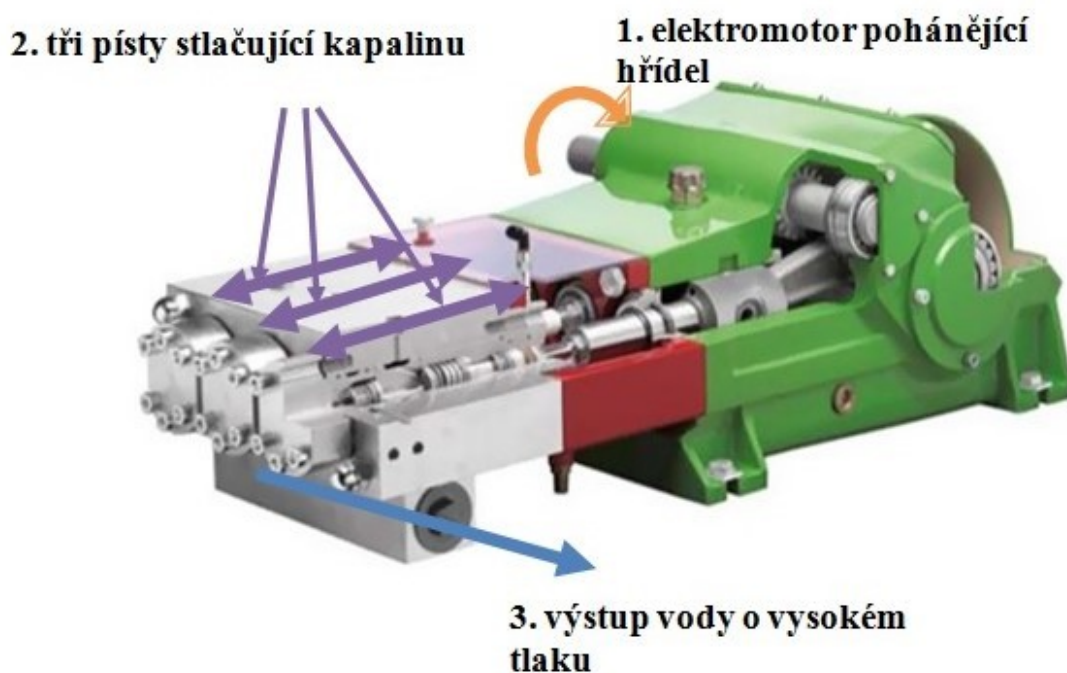


Obr. 3.2 Vysokotlaké čerpadlo ECOTRON 40.37 s multiplikátorem [8].

Pístová čerpadla

U vysokotlakých pístových či hyplexových čerpadel, kde je násobičem tlaku tří či víceplexový plunžr je tlakový okruh pouze jeden. Elektromotor otáčí pro technologii upravenou zalomenou hřídelí, na které se v umístění za sebou nacházejí písty. Výsledný tlak tedy vzniká postupným stačováním kapaliny ve třech pístech. Výsledné pracovní médium s již vysokým pracovním tlakem je poté směřováno přes vysokotlaké potrubí do řezací hlavy. U strojů používající triplexový plunžr se nedosahuje takových tlaků jako u strojů s multiplikátorem. Z toho důvodu se zpočátku tato zařízení využívala výhradně pro čištění povrchů či odstraňování vrstev plošně působícím tlakem. Avšak stroje s

triplexovým plunžrem jsou díky svým vlastnostem a především účinností, která dosahuje až 95 % velmi moderní a cenově přijatelnou variantou k dosažení vysokého tlaku. Další výhodou je eliminace použití akumulátoru (tlumiče rázu), protože písty ve válcích pracují v určité frekvenci. V dnešní době již např. společnost Flow International Corporation nabízí stroje s plunžrovým čerpadlem dosahující tlaků až 380 MPa. Při tomto tlaku jsme již schopni s vhodně zvolenými parametry vytvořit vodní paprsek s dostačující kinetickou energií pro snadné obrábění materiálů. Stručný popis funkce triplexového čerpadla je znázorněný na obr. 3.3 [1, 9].



Obr. 3.3 Princip funkce triplunžrového čerpadla K 55000 [7].

3.2 Multiplikátory

Multiplikátor (hydraulický zesilovač či násobič) je součástí hydraulické jednotky. Samotný multiplikátor se skládá z nízkotlakého a vysokotlakého okruhu, přičemž princip spočívá v tom, že do multiplikátoru je přiveden olej o tlaku p_1 (21 MPa) působící na plochu S_1 . Tím dojde k pohybu pístu, což zapříčiní vznik pracovního tlaku provozní kapaliny p_2 (410 MPa). Zjednodušeně řešeno vycházíme ze znalostí rovnováhy sil působící na nestejně plochy diferenciálního pístu, přičemž pokud na plochu S_1 působíme tlakem p_1 pak platí, že tlak p_2 musí být tolikrát větší kolikrát je menší plocha S_2 , což je výsledek ke kterému došel již v 17. století našeho letopočtu vědec Blaise Pascal. Ačkoliv vycházíme z teoretického

podkladu tzv. Pascalova zákona, pro korektní výpočet jej vlivem ztát musíme upravit o tzv. ztrátový koeficient pro výpočet tlaku, který se značí $\eta_M(2)$ [6, 17].

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} * p_1 * \eta_M \quad [Pa] \quad (2)$$

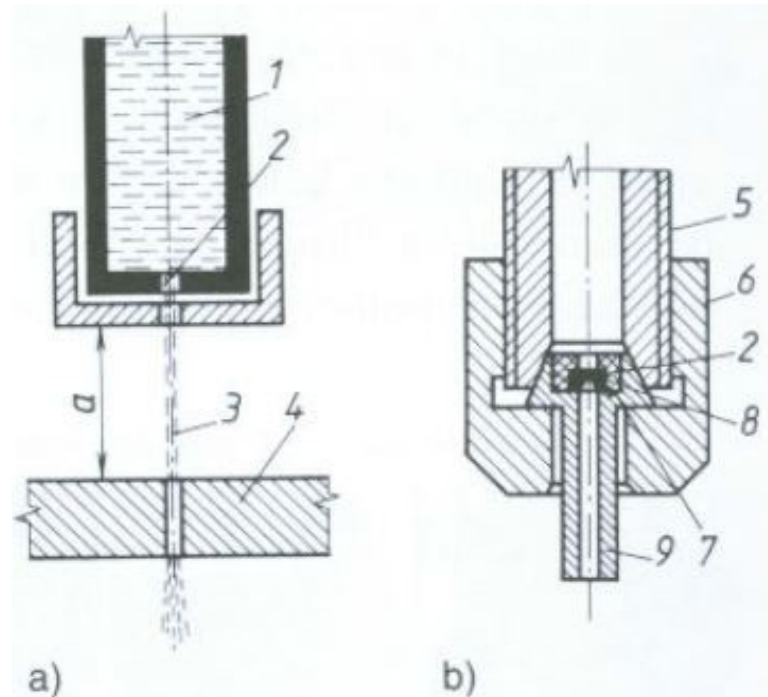
3.3 Řezací hlavy

Řezací hlava je jednou z nejdůležitějších částí vysokotlakého systému, protože se v ní utváří konečný tvar vodního paprsku tím, že přemění vysokotlakou kapalinu v řezný nástroj. U technologie AWJM se v řezací hlavě také nachází směšovací komora, ve které dochází k promísení vysokotlakého paprsku vody s abrazivem. To znamená, že řezací hlavy mají výrazný vliv na efektivitu obrábění a kvalitu řezu. Proto se výrobci stále snaží o zdokonalování řezacích hlav, přičemž hlavním cílem vývojářů je v poslední době snaha o co možná nejdokonalejší promíchání abrazivních částic s pracovním médiem ve směšovací komoře [17].

Typy řezacích hlav jsou rozdílné z hlediska technologického využití:

- pro čistý vodní paprsek,
- pro abrazivní vodní paprsek.

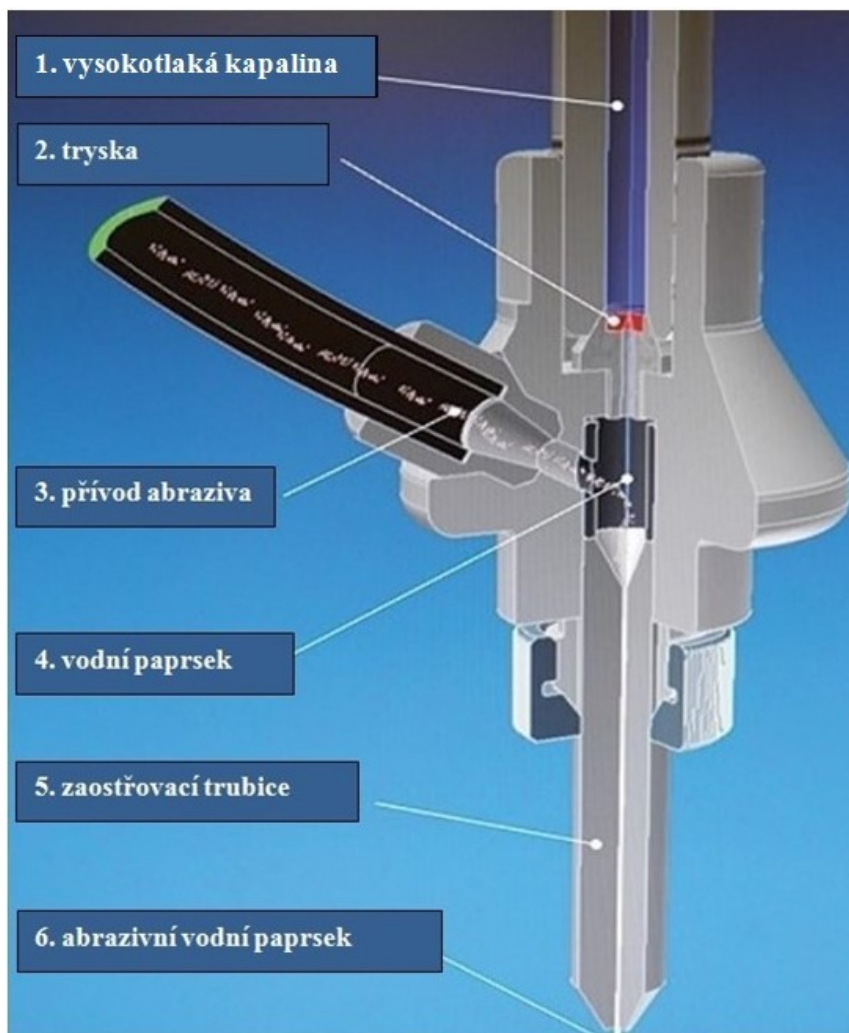
Na obr. 3.4 můžeme vidět řezací hlavu pro čistý vodní paprsek. Protože technologie WJM využívá pro narušení povrchu pouze vysoký tlak vody bez abraziva, je konstrukce řezací hlavy velmi jednoduchá. Řezací hlava pro čistý paprsek obsahuje pouze trysku (nejčastěji ze saříru) o velmi malém průměru, kde se po průchodu vysokotlakého pracovního média utvoří usměrněný paprsek s dostatečnou kinetickou energií k narušení měkkých či středně měkkých materiálů.



Obr 3.4 Pracovní řezací hlava pro čistý vodní paprsek [29].

- a) schéma, b) provedení výstupní safírové trysky
 b) 1 - tlaková kapalina, 2 - výstupní tryska, 3 – kapalinový paprsek, 4 – obrobek, 5 – potrubí, 6 – matice, 7 - lůžko trysky, 8 – držák trysky, 9 – stabilizátor proudu paprsku (nemusí být vždy přítomen), *a* - vzdálenost trysky od povrchu obrobku

Na obr. 3.5 můžeme vidět řez abrazivní řezací hlavy s popisem nejdůležitějších částí. Oproti konstrukci řezací hlavy pro technologii čistého vodního paprsku, se zde nachází mimo jiné směšovací komora, do které je přiváděno abrazivo. Funkce směšovací komory již byla popsána v kapitole zabývající se technologií AWJM. Paprsek vytvořený průchodem vysokotlakého pracovního média tryskou ve směšovací komoře nasaje abrazivo a pokračuje do zaostřovací trubice, kde se abrazivní paprsek utváří do finální podoby. Rozdíl je tedy také v umístění trysky, protože na rozdíl od abrazivních paprsků, kde se nachází v horní části řezací hlavy, u technologie WJM je umístěna ve spodní části řezací hlavy [6, 17].



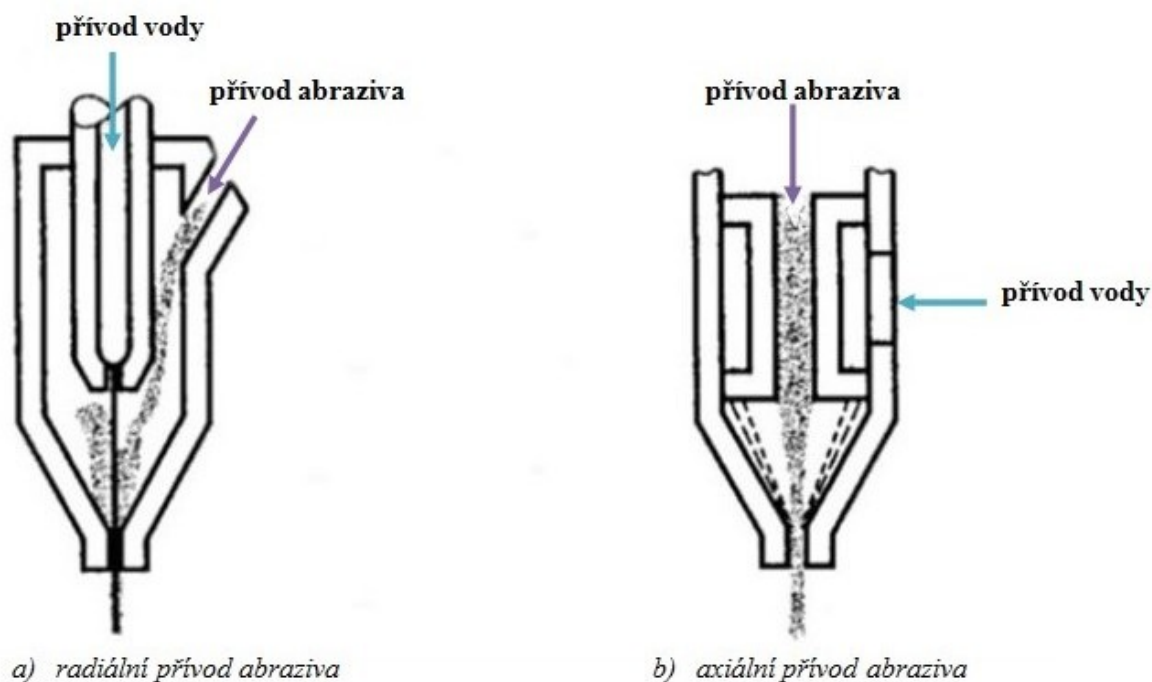
Obr. 3.5 Abrazivní řezací hlava [1].

U řezacích hlav pro abrazivní vodní paprsky rozlišujeme dva základní typy přívodu abraziva do směšovací komory:

- s radiálním přívodem abraziva,
- s axiálním přívodem abraziva.

Na obrázku 3.6 můžeme vidět dva typy přívodů abraziva, přičemž obr. 3.6a představuje konstrukčně jednodušší typ, který je v dnešní době mnohem rozšířenější a využívá se u technologie AWJM. Dokonce jej lze použít i pro čistý vodní paprsek. Tryska na obr. 3.6b byla zkoumána na Cranfield University ve Velké Británii, jednalo se však pouze o zkušební trysku, která nebyla komerčně ve větší míře využita. Avšak axiální typ přívodu

abraziva má jistou výhodou v lepším promíchání abraziva s pracovním médiem, což vede k lepším řezným vlastnostem a menšímu opotřebení obvodu trysky [30].

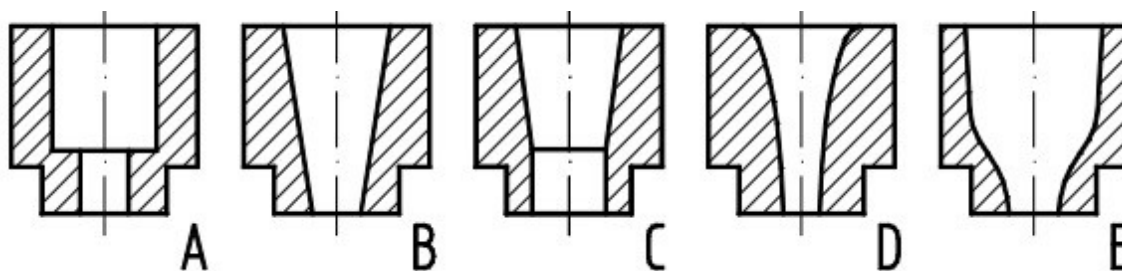


Obr. 3.6 Řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsky [31].

3.3.1 Vodní trysky

Vodní tryska či v některých literárních pramenech označená jako vodní dýza je základní a nejdůležitější část řezací hlavy, jelikož vytváří a tvaruje samotný vodní paprsek. Pro výběr materiálu, ze kterého se trysky vyrábějí, je nejdůležitějším parametrem pracovní tlak, kterým bude zatížena. Pro trysky, kde se tlak vody pohybuje do 150 MPa, volíme nerezavějící ocel, při tlacích do 250 MPa se používá keramika či tvrdokovy. Pro pracovní tlaky vyšší jak 250 MPa se používají trysky vyrobené z rubínu, safíru či umělého diamantu, přičemž průměry trysek jsou v rozsahu 0,075 až 1,5 mm. Diamantové trysky jsou v dnešní době stále více používané z důvodu nejdelší životnosti, která dosahuje v extrémních případech při velmi vysoké kvalitě vody až 1000 pracovních hodin, což je přibližně 5 krát více než u trysek safírových. Pořizovací cena je u diamantových trysek zhruba 2 krát větší, než u safírových trysek [6, 17, 21].

Z důvodu široké univerzálnosti technologie vodních paprsků existuje mnoho tvarů vodních trysek v závislosti na pracovních tlacích a pracovních kapalinách, z nichž nejpoužívanější jsou znázorněné na obr. 3.7.



Obr. 3.7 Geometrické tvary nejpoužívanějších typů trysek [6].

A – válcová, B – kuželová, C – kombinovaná, D – kónická, E – složená či bikubická

3.4 Zaostřovací trubice

Samotná zaostřovací trubice, nacházející se v řezací hlavě je poslední část celého vodního systému, která může ovlivnit výstupní abrazivní vodní paprsek a to svoji délkou a svým průměrem. Běžně se pro přesné dělení používá průměr 0,8 mm až 1,2 mm při délce 75 mm až 125 mm.

Z důvodu provozuschopnosti a zachování kvality jsou na zaostřovací trubice kladeny vysoké nároky a to zejména na otěruvzdornost. Z toho důvodu jsou materiály použité pro výrobu zaostřovacích trubic extrémně tvrdé. Avšak neustále proudící pracovní médium zintenzivňuje abrazivem přesto postupně trubici opotřebovává. Některé zdroje uvádí, že ústí trubice se zvětší cca o 0,002 mm za jednu hodinu provozu. V tabulce 3.1 můžeme vidět výrobci udávanou životnost směšovacích trubic vyrobených z různých materiálů [6, 17, 21].

Tab. 3.1 Životnost zaostřovacích trubic [15].

Materiál	Životnost [hod]	Popis
Standardní karbid wolframu	4 - 6	Původní zaostřovací trubice. Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají sklon k mimoosovému opotřebování, požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karbid	35 - 60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů nebo pro zaučování nového operátora.
Střední životnost kompozitní karbid	80 - 90	Vhodné pro všechny aplikace dělení materiálů.
Premium kompozitní karbid	100 - 150	Nejlepší vlastnosti. Vykazuje souosé a předvídatelné opotřebování. Užívá se pro přesné řezání i každodenní práce.

3.5 Vysokotlaké potrubí

Celý systém rozvodných vysokotlakých potrubí a dalších spojovacích elementů slouží k dopravě pracovního média a abraziva do řezací hlavy. Rozvodné prvky systému jsou normalizované a standardizované a to převážně z důvodu snadné vyměnitelnosti a komplexní údržby. Vysokotlaké potrubí se vyrábí z vysokopevnostních korozivzdorných materiálů, což jsou typické vlastnosti u vysokopevnostních austenitických ocelí třídy 17 (především ocel 17 351) [6, 15].

Na všechny prvky rozvodného systému jsou kladeny velmi vysoké nároky. Především v oblasti korozivzdornosti, těsnosti, odolnosti proti vysokým tlakům a hydraulickým rázům. Průměr použitého potrubí se liší podle hodnoty pracovního tlaku, kterému je zatíženo. Při tlacích do 700 MPa se používá vysokotlaké potrubí o vnějším průměru do 15 mm a vnitřním do 7 mm. Obecně však platí, že čím vyšší je tlak, tím menší je vnitřní průměr [6].



Obr. 3.8 Vysokotlaké potrubí pro vedení pracovního média [14].

3.6 Zařízení pro úpravu vody a aditiva

Voda jakožto experimenty a léty praxe zjištěné nejvhodnější pracovní médium je klíčovým elementem při obrábění vodním paprskem, takže je nezbytně důležité zajistit co možná nejvyšší kvalitu pracovního média. Úprava vody je nutná z důvodu předcházení znečišťování otvoru trysky a agresivnímu působení na kov, těsnění a zpětné ventily. Nevhodná či

zanedbaná úprava vody má za následek snížení výkonnosti a životnosti celého systému. V zásadě jsou dva základní typy příměsí způsobující problémy u obrábění vodním paprskem a to usazeniny (miniaturní částičky hmoty) a plně rozpuštěné pevné látky (převážně magnézium a vápník) [6].

Zvolená úprava vody závisí na čistotě vstupní vody a na požadavku životnosti opotřebovaných komponentů (především vodní trysky), přičemž v praxi se využívá tří základních principů úprav vody:

- mechanická úprava vody (filtrace),
- fyzikálně – chemická úprava vody,
- biologická úprava vody [6].

3.6.1 Mechanická úprava vody

Filtrace neboli proces oddělování (separace) pevných částic od kapalných. Při filtraci u vodních paprsků se využívá tzv. hluboký filtr, který je složen z několika vrstev. První vrstva zachytí největší příměsi a poslední filtr již ty nejmenší co je možné zachytit. Takto nastavená filtrace dokáže zachytit usazeniny o velikosti 1,2 μm až 0,5 μm , přičemž regenerace filtrů se provádí tzv. proplachem v předem nastavených časových intervalech [6, 22].

3.6.2 Změkčování

Změkčování vody je přípravný krok před reverzní osmózou nebo deionizací. Vzhledem k rozdílné tvrdosti vody ve světě vznikla stupnice, která tvrdost vody rozděluje (viz tab. 3.2). Základní jednotkou tvrdosti je mmol^{-1} , avšak v Německu se používá $^{\circ}\text{dH}$ a ve Francii $^{\circ}\text{F}$. Změkčování lze označit za proces iontové výměny, který je složen z nádržky s pryskyřicí a z nádržky se slanou vodou opatřenou kontrolní záklopkou. Voda protéká přes pryskyřičné řečiště a plastický materiál skládající se z milionů malých zrněk. Voda stéká přes malá zrnka, ionty hořčíku a vápníku, které jsou kladně nabitě, se v poměru 1 : 1 vymění se záporně nabitými ionty vodíku obsažené ve slané nádržce s vodou. Posléze se sodíkové ionty na zrnkách uvolní a jsou vypuštěné z vody [30].

Tab. 3.2 Rozdělení tvrdosti vody [6].

Voda	mmol ⁻¹	°dH	°F	Poměr
velmi tvrdá	> 3,76	> 21,01	> 37,51	1 mmol ⁻¹ = 5,6 °dH
tvrdá	2,51 – 3,75	14,01 - 21	25,01 – 37,5	1 mmol ⁻¹ = 10 °F
středně tvrdá	1,26 – 2,5	7,01 - 14	12,51 - 25	
měkká	0,7 – 1,25	3,9 - 7	7 – 12,5	°dH = 1,79 °F
velmi měkká	< 0,5	< 2,8	< 5	

3.6.3 Deionizace

Deionizace je stejně jako změkčování založená na iontové výměně pouze s tím rozdílem, že využívá kationtové i aniontové pryskyřice rozdělené ve dvou nádržích. Vstupující voda a požadovaná kvalita má vliv na volbu pryskyřice. Důležitou výhodou této metody je úplné rozpuštění částic, jednoduchá obsluha a také skutečnost, že z litru vstupní vody je litr upravené vody [6].

3.6.4 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza je metoda, při které je voda stlačena vysokým tlakem a usměrňována přes polopropustnou membránu, která zachycuje rozpustné částice a nečistoty. Zachycené nečistoty jsou dále odváděny do odtoku, čímž se odděluje očištěná voda. U této metody se počítá s odstraněním 95 % až 98 % nečistot [6].

3.6.5 Biologická úprava

Biologická úprava vody je zapotřebí, pokud není mechanické čištění dostatečné. Voda před biologickou úpravou je již po mechanickém čištění. Tato metoda využívá aerobní bakterie, které odbourávají až 99 % organického znečištění vody [32].

3.6.6 Aditiva

Aditiva jsou přísady na bázi polymerů s lineárními molekulami, které se přidávají do vody pro vytvoření souvislého paprsků. Aditiva zamezují vytvoření nadměrné turbulence, tím vzniká proud vody energeticky koncentrovanější s větším energetickým potenciálem. Takto obohacený paprsek se neroztříští o obráběný materiál díky kompaktnímu jádru. Nejtypičtějšími příklady aditiv je roztok vody s polymerem polyakrylamid (PAA)

tvořeného z akrylamidových podjednotek, nebo s polymerem polyethylenoxid (PEO) tvořeného dvouuhlíkovými jednotkami [17].

3.7 Řezací stoly

Z důvodu konkurenceschopnosti na poli nekonvenčních technologií a efektivní výroby je automatizovaný provoz nezbytný. CNC stůl se skládá z počítačem řízeného souřadnicového portálu využívajícího CAD/CAM systém a pracovního stolu. Abychom mohli zaručit vysokou flexibilitu, kvalitu a přesnost řezu, bývá pracovní stůl zajištěn tuhou a dostatečně pevnou konstrukcí vyrobenou z korozivzdorných materiálů.

Na povrchu pracovní plochy stolu se nachází plechové lamely či v praxi rozšířené plechové rošty pro snadnou manipulaci s obrobkem. Stůl je dále vybaven odtokovými kanálky pro odvod použitého pracovního média s částčkami materiálu obroušeného z obrobku. Součástí zařízení je také hluboká nádoba naplněná vodou, která je umístěna pod pracovní plochou, sloužící k utlumení energie paprsku, který projde obrobkem. Rozměry stolů se běžně pohybují v rozmezích od délky 1 m až 10 m a šířky 1 m až 4,5 m, avšak stále častěji jsou na přání zákazníka individuální. Souřadnicový systém zajišťuje bezproblémový posuv řezací hlavy nad obrobek za pomoci souřadného systému. Posuv je zabezpečen kuličkovými přesnými šrouby schopnými posuvu s přesností až na jednu tisícinu mm. K polohování stolů se nejčastěji používají servomotory. Celý portálový souřadnicový systém je vždy oddělený od lapače použitého pracovního média [6, 17, 22, 33].



Obr 3.9 CNC souřadnicový stůl společnosti PTV (model cobra) [16].

3.8 Dávkovač abraziva

Systém dopravy abraziva do řezací hlavy začíná u velkokapacitního zásobníku na abrazivo (1), ze kterého se potrubím přivádí do odměřovacího zásobníku (2) umístěného nad řezací hlavou (3). Odměřovací zásobník je řízen elektronicky z důvodu přesného dávkování, které ovlivňuje řezné parametry. Systém je opatřen optickou a akustickou signalizací varující před nedostatkem abraziva či ucpání dopravního potrubí [6].

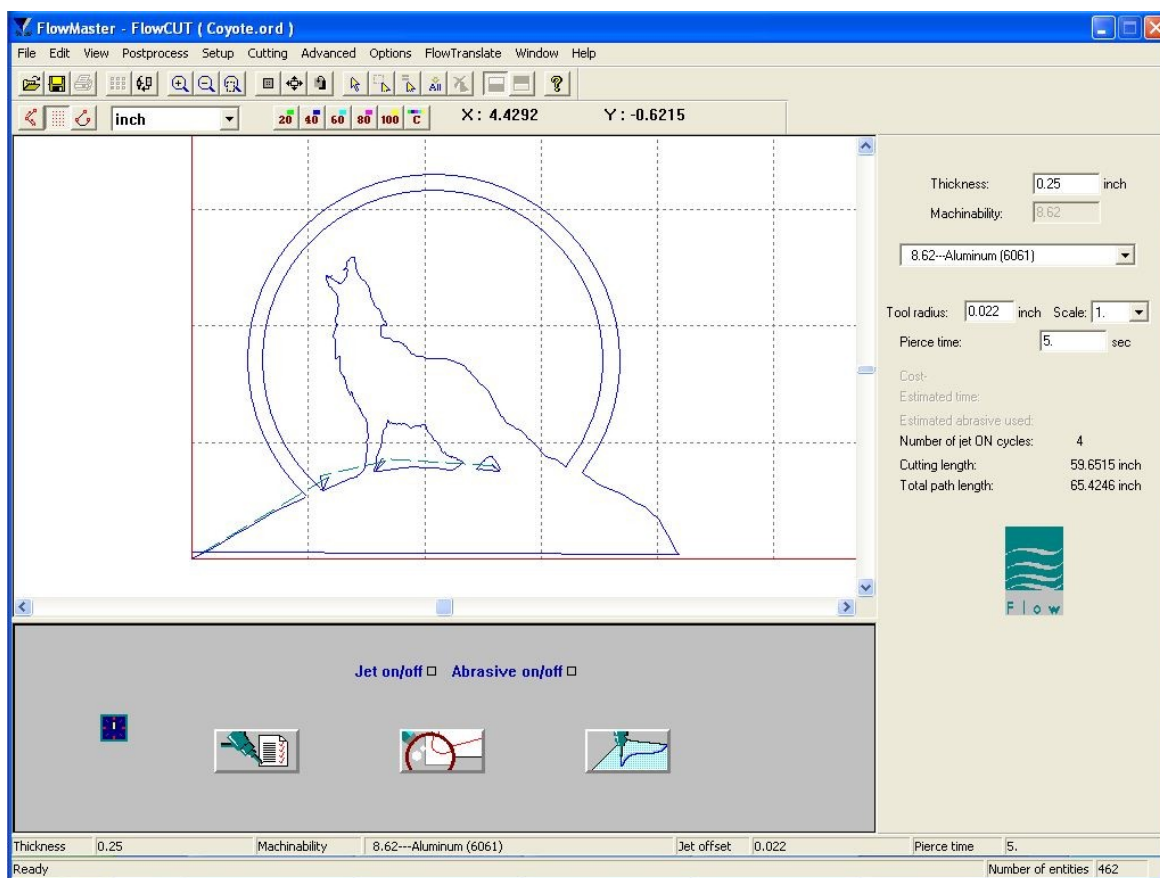


Obr. 3.10 Systém dopravy abraziva [1].

3.9 Software pro zadávání vstupních dat a řízení pohybu

Softwary používané v oblasti vodních paprsků, až na výjimečné případy, podporují CAD/CAM systém. Do softwaru, který řídí komunikaci mezi obsluhou a strojem, lze nahrát výkresovou dokumentaci vytvořenou v CAD prostředí a následně vytvořit řídicí program s NC kódem, který je schopen na základě vstupních dat nastavit optimální řezné vlastnosti pro dosažení požadované přesnosti a kvality řezu. Výhodou využívání programů s NC kódem je možnost opětovného použití ve výrobě a také schopnost ověření správnosti řezných parametrů v simulačním prostředí přímo na PC [1, 6, 21].

Mezi nejpoužívanější softwary patří inteligentní řídicí systém Flow MASTER od společnosti Flow a řídicí systém AsperWin od firmy MicroStep CDM.



Obr. 3.11 Rozhraní softwaru Flow MASTER [1].

3.10 Těsnění a filtry

Filtry jsou nenahraditelnou součástí technologie vysokorychlostních vodních paprsků, jelikož chrání zařízení před usazeninami o velikosti 1,2 μm až 0,5 μm a tím prodlužují životnost všech komponentů zařízení, které je v kontaktu s pracovním médiem. Filtry se regenerují tzv. proplachem, avšak pro jejich dostačující účinnost se musí před výrobcem stanovenou životností vyměnit. V hydraulickém zařízení se nacházejí dva typy filtrů a to vysokotlaký filtr a nízkotlaký filtr [22].

Vysokotlaký filtr se nachází před řezací hlavou. Tlak vody je zde již velmi vysoký, z toho důvodu se jako materiál volí kovové filtry na bázi slinutého karbidu či mikrosítek, naproti tomu nízkotlaký filtr se nachází před multiplikátorem, kde se nedosahuje vysokých tlaků. Nízkotlaké filtry se vyrábějí ze syntetických vláken nebo bavlny.



Obr. 3.12 Nízkotlaký filtr [16].



Obr. 3.13 Vysokotlaký filtr [44].

Těsnění udržuje celkovou stabilitu tlaku v systému, takže jsou na ně kladeny vysoké nároky, současně je to také nejvíce opotřebovaná část celého systému. U konstrukce technologie vodních paprsků se těsnění využívá pro utěsnění vysokotlaké komory multiplikátoru, kde se tlak pohybuje v hodnotách 200 MPa až 500 MPa, je tedy nutné vybrat těsnění s nízkým průsakem, minimálním třením a co nejvyšší životností.

Dále se využívá těsnění s mezikroužky, které funguje na principu částečné deformace mezikroužku a následném utěsňování povrchů válce a pístu. Materiál pro jejich výrobu je z různě modifikovaných plastů (převážně teflon či skelná vlákna), přičemž k deformaci mezikroužků v praxi dochází pomocí tzv. autodeformace nebo předpětím, které vzniká působením kovového kroužku, kuželu a přitlačné matice [6, 17].



Obr. 3.14 Vysokotlaká sada těsnění od firmy PTV [16].

3.11 Abrazivo

Abrazivo se využívá u technologií AWJM a ASJM pro zintenzivnění procesu a následné rozšíření možného komerčního využití. Abrazivní materiál ve spojení s vysokotlakým pracovním médiem, vytváří abrazivní paprsek, který je díky své progresivitě schopen narušit povrch všech známých materiálů. Cena abraziva je nejnákladnější položkou při obrábění vodním paprskem, proto je velmi důležité dbát na správný výběr, jelikož abrazivo přímo ovlivňuje efektivitu obráběcího procesu. V dnešní době jsou nejrozšířenějšími typy abraziv přírodní minerály, jako jsou granát, olivín, korund, případně abraziva uměle vyrobená, protože u vytvořených materiálů známe jejich vlastnosti [6, 14, 16].

Mezi nejdůležitější faktory určující formu a vlastnost abraziva řadíme: zrnitost, tvrdost, řezivost, cenu, recyklovatelnost, ekologickou a zdravotní nezávadnost.

a) Zrnitost

Zrnitost ovlivňuje rychlost a kvalitu řezu. S rostoucím zjemněním abraziva se zvyšuje kvalita obráběného povrchu, avšak řezná rychlost v_p je nižší. Zrnitost se udává v jednotkách MESH (počet ok fiktivního síta na čtvereční palec).

- hrubá zrnitost (MESH 16, 36,...),
- střední zrnitost (MESH 60, 80,...),
- jemná zrnitost (MESH 100, 150,...).

b) Tvrdost

Optimální tvrdost abraziva se volí v závislosti na obráběném materiálu. Tvrdé abrazivní částice dosahují vyšší účinnosti, avšak za následek to má také výrazně vyšší opotřebení, zejména trysky a zaostřovací trubice.

c) Řezivost

Je určena krystalickou strukturou abrazivních částic, které nesou tvar kubické krystalové mřížky, jež zaručuje větší odolnost proti otupení. Abrazivo s takto orientovanou strukturou lze po recyklaci opět použít v provozu, ovšem s již přibližně o 30 % nižším řezným potenciálem.

d) Cena

U výběru abraziva má cena svoji váhu, jelikož v některých případech tvoří cena abraziva až 50 % provozních nákladů. Z toho důvodu musíme citlivě volit poměr mezi cenou a kvalitou řezu [6, 16, 21].

Nejčastěji používaná abraziva

V současné době se nejvíce využívají abraziva na bázi granátového případně olivínového písku. Splňují zdravotní nezávadnost i dostatečný abrazivní účinek, přičemž v praxi se díky nejlepším abrazivním účinkům využívá převážně australský či indický granát.

Australský granát má jedinečnou tvrdost a pevnost zrn, čímž zaručuje vysokou produktivitu s nízkou drsností povrchu. Společnosti prodávající abrazivo se na svých stránkách často úplně neshodují v chemickém složení. Pro příklad uvádím Tab. 3.3 vytvořenou z údajů firmy PTV [16, 21].

Tab. 3.3 Složení australského granátu uváděné firmou PTV [16].

Chemické složení								
Sloučenina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO
Množství [%]	36	20	30	2	1	1	2	6
Minerální složení								
Minerál	Granát	Ilmenit	Zirkon	Křemen	Ostatní			
Množství [%]	97 - 98	1 - 2	< 0,2	< 0,5	< 0,25			

V potravinářském průmyslu lze jako abrazivo použít např. sůl, nebo led k řezání zmrzlých ryb či filet z ryb.



Obr. 3.15 Australský granát typu GMA [16].

Recyklace abraziva

Již při výběru abraziva, by se mělo dbát na jeho možnou budoucí recyklaci. Pro potřeby recyklace se používají tzv. recyklační jednotky. Vzhledem k tomu, že při řezném procesu se efektivně využívá přibližně 30 % až 50 % abraziva, je recyklace smysluplná.

Recyklační jednotky fungují tak, že z lapače vody se pomocí membránového čerpadla odsaje směs abraziva a vody. Tato směs prochází přes síta vibračního separátoru, kde dochází k prvotní separaci. Abrazivo, které projde sítím, se dále nepoužívá a putuje do odpadní nádrže, zbylé abrazivo zachycené sítím je přepravováno do sušičky, kde se suší. Již usušené abrazivo prochází třídičkou, která rozděluje jemná a hrubá zrna. Roztříděné abrazivo pomocí vzduchového dopravníku putuje do zásobníku, připravené k opětovnému použití.

Recyklační jednotky jsou velmi nákladné, proto se používají v případě velké spotřeby abraziva, která se pohybuje kolem 30 a více tun abraziva za měsíc. Podniky nevlastnící recyklační jednotku použité abrazivo odvázejí na skládky nebo jej nechávají recyklovat u firem specializujících se na problematiku abraziv [6, 16].

4. Srovnání technologie AWJ a ASJ

4.1 Technologické a účinnostní rozdíly

Obě technologie by se mohly někomu zdát téměř shodné, jelikož na konci obou technologií je abrazivní řezný nástroj schopen díky své kinetické energii porušit téměř všechny materiály. Z toho důvodu uvádím v této kapitole nejdůležitější rozdíly mezi těmito metodami generování abrazivního paprsku. Hned na počátku je důležité si ovšem uvědomit, že vývoj a inovace technologie ASJ nemá za cíl nahradit technologii AWJ, ale spíše rozšířit další možné komerční uplatnění vodního paprsku [6].

Za hlavní rozdíl lze označit způsob vytvoření řezné směsi, která je následně pod vysokým tlakem vedená přes otvor trysky u ASJ a přes otvor zaostřovací trubice u metody AWJ. U technologie AWJ se abrazivo strhává paprskem ve směšovací komoře díky vytvořenému podtlaku po průchodu vysokotlakého pracovního média tryskou. Naproti tomu technologie ASJ využívá tlakovou nádobu naplněnou vodou a abrazivem k utvoření řezné směsi. Tato směs je pak podle typu generování paprsku protlačována pod vysokým tlakem tryskou umístěnou v řezací hlavě. Abychom nenarušili standardní proces řezání, musíme řeznou směs neustále udržovat v suspenzi. Pro zlepšení vlastností paprsku (zejména ke zlepšení jeho koherence) se někdy využívá polymerů [2, 39].

Velmi důležitý je také výběr abraziva, jelikož to rozhodujícím faktorem ovlivňuje řezný proces, a kromě toho tvoří značnou část výrobních nákladů. Mezi nejžádanější abraziva patří indický a australský granát. Podrobný popis abraziv používaných u abrazivního paprsku je uveden v kapitole 3.11. Při výběru abraziva je potřeba vzít v potaz další velký rozdíl mezi technologiemi, čímž je výstupní průměr určující šířku paprsku. U AWJ je výsledná šířka paprsku určena díky velikosti průměru zaostřovací trubice. U technologie mikro ASJ prochází vysokotlaká suspenze pouze jednou tryskou malého průměru. Vzhledem k tomu, že průměr běžné zaostřovací trubice bývá 2 až 3 krát větší než otvor trysky u mikro ASJ, je zřejmé, že výsledný paprsek generovaný metodou mikro ASJ bude mnohem tenčí, z čehož plynou následující výhody:

- Možnost velmi tenkých spár díky malému průměru trysky,
- úzký paprsek lze využít v těsných prostorech (např. uvnitř trubky),
- vysoká hustota energie (energie působící na jednotku plochy),
- možnost využít velkých průtoků abraziva [33, 41].

Bylo provedeno nespočet porovnávacích experimentů, přičemž jedním z nich bylo zjištění potřebných vstupních parametrů k dosažení stejné hloubky řezu u obou metod. Experimenty ukázaly, že při shodném průtoku vody lze u obou technologií dosáhnout stejných výsledků jen s tím rozdílem, že ASJ potřebují pro dosažení potřebné erozivní síly přibližně čtvrtinový tlak. Důvodem tohoto výsledku se nakonec ukázal fakt, že u ASJ dochází k mnohonásobně lepšímu promíchání vody s abrazivem, proto byla také výsledná erozivní účinnost několikanásobně větší. Technologie AWJ se skládá přibližně z 95 % vzduchu, 4 % vody a 1 % abrazivních částic, zatímco ASJ se skládá asi z 95 % vody a 5 % abraziva, proto se ASJ vyznačují efektivnějším způsobem urychlování částic a vyšší paprskovou stabilitou, díky čemuž dosahují vyšší řezné účinnosti. Vzhledem k tomu, že u ASJ je paprsek generován pouze jednou tryskou, kterou prochází pod vysokým tlakem suspenze, má to za následek zvýšení hydraulického výkonu paprsku, což vede k jeho větší účinnosti. Tuto mimořádnou účinnost řezání lze vzít v úvahu zejména při dlouhých časech řezání, řádově v několika hodinách. Této skutečnosti se využívá například při demontáži jaderných elektráren či komplexních konstrukcí [4, 33, 37].

Rozdílné vlastnosti obou typů abrazivních vodních paprsků vedly k jejich následným hlavním aplikačním využitím. Díky vysoké flexibilitě se AWJ komerčně využívá zejména pro účely strojního obrábění. Na druhé straně vysoká účinnost ASJ umožnila prosazení technologie zejména v oblastech demontáží, demilitarizací a vyřazování složitých konstrukcí z provozu nad i pod vodní hladinou. U technologie AWJ je výstupní paprsek vycházející z řezací hlavy připojen k přívodnímu potrubí přivádějící abrazivo, což je velmi limitující v odlehlých oblastech, či při řezání v nebezpečných prostorách. Pro tyto případy je využívána právě metoda abrazivního suspenzního paprsku [4, 40, 41].

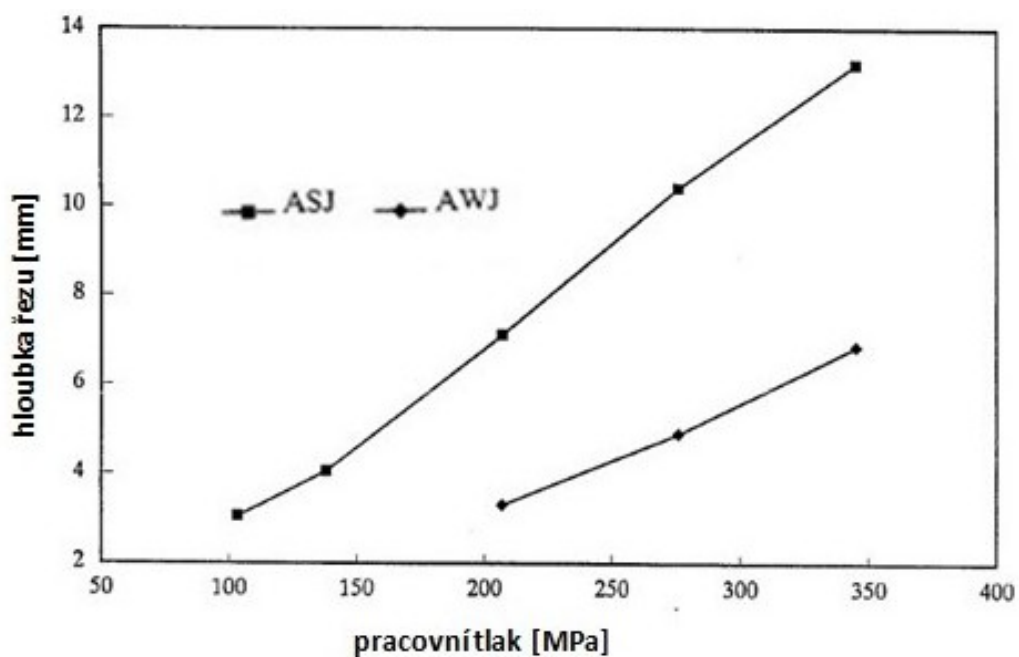
U obou metod jsme relativně omezeni při řezání materiálů s dutou strukturou, jelikož po průchodu pevným materiálem se paprsek v další fázi ohýbá a při opětovném styku paprsku s materiálem v další pevné části je již viditelně zkreslen. Poměrně elegantním řešením tohoto problému je u technologie ASJ přidání polymerů pro zvýšení stability paprsku. [33, 39].

Na Southwest Research Institute provedli zajímavý experiment, při kterém se zjišťovala změna hloubky řezu při růstu pracovního tlaku. Pro generování abrazivního suspenzního paprsku se využilo bypassového okruhu. Experiment se prováděl na materiálu ze skla při tlaku 51 MPa a rychlosti posuvu 10,2 mm/min, přičemž hloubka řezu byla 0,79 mm. Když se pracovní tlak zvýšil na 100 MPa, hloubka řezu se zvýšila na hodnotu 3,2 mm, ovšem je nutno podotknout, že spotřeba vody a abraziva byla též mnohonásobně vyšší. Dalším cílem experimentu bylo určit hlavní parametry řezného procesu potřebné k bezproblémovému řezání oceli tloušťky 6,35 mm u technologií AWJ a ASJ. Výsledek zjištěný experimentem lze vidět v tab. 4.1 [35].

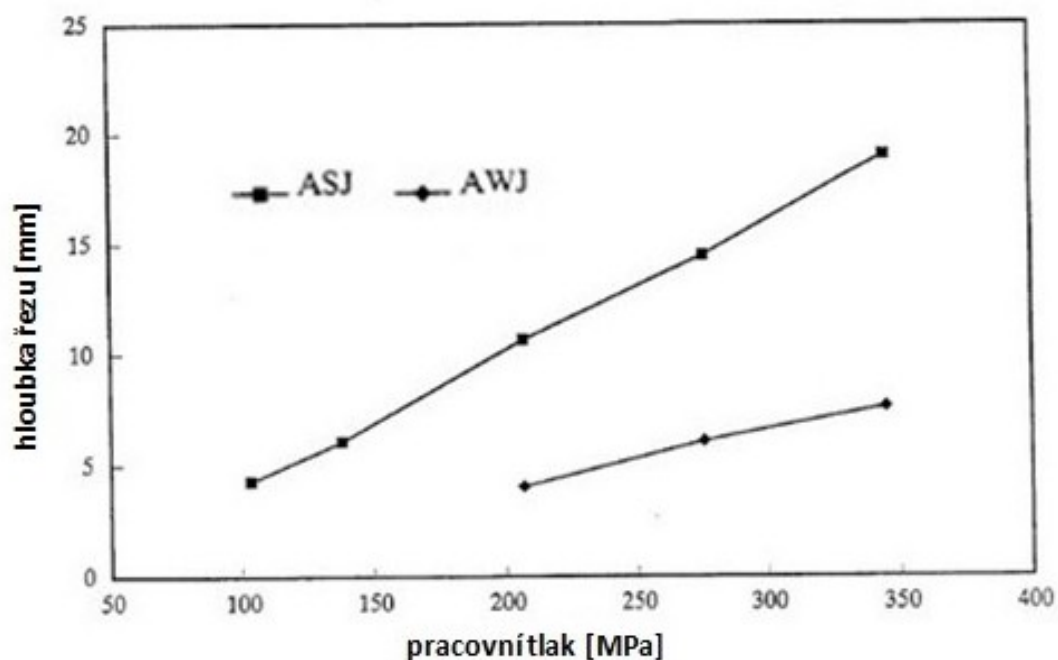
Tab. 4.1 Srovnání metody AWJ a ASJ na materiálu tloušťky 6,35 mm [35].

Parametry		Technologie	
		AWJ	ASJ
Tlak čerpadla	[MPa]	207	52
Rychlost posuvu	[mm/min]	10,2	5,1
Energie	[kcal/min]	65,7	9,4
Energie	[kcal/mm/min]	0,64	0,18
Průtok abraziva	[g/min]	217	81,6
Průtok abraziva	[g/mm]	2,6	1,6
Velikost abraziva	[-]	60 - 80 MESH	75 – 106 mm
Průtok vody	[l/mm]	0,013	0,015
Hloubka řezu	[mm]	1,6	≤ 0,79

Mohamed Hashish ve své publikaci naznačil, že při rovnocenném pracovním tlaku je technologie ASJ schopna dosáhnout dvojnásobku řezného rozsahu AWJ. Svůj názor doložil experimentem, při kterém obě metody porovnal. Pro větší přehlednost využil dvě hodnoty koncentrace suspenze. Aby zajistit, co možná nejvyšší přesnost experimentu byly použity při řezání hliníku u obou metod stejné vstupní podmínky. Průměr vodního paprsku byl 0,229 mm, hodnota vzdálenosti výstupu paprsku od obrobku byla 1,5 mm, při rychlosti posuvu 17 mm/s. Jako abrazivo použil australský granát zrnitosti MESH 80. Na obr. 4.1 můžeme vidět porovnání při hodnotě koncentrace suspenze 12%, přičemž pro srovnání lze na obr. 4.2 vidět rozdíl při zvýšení hodnoty koncentrace suspenze na 24%. Přehledně lze rozpoznat, že při tlaku asi 100 MPa u ASJ dosahujeme přibližně stejné hloubky řezu, jako při tlaku 200 MPa u AWJ. Dle závěru experimentů se hustota energie odhaduje u ASJ asi o 390 % vyšší, než jakou je schopna vyvinout technologie AWJ [33].



Obr. 4.1 Závislost tlaku na hloubce řezu u metod AWJ a ASJ při 12% koncentraci suspenze [33].



Obr. 4.2 Závislost tlaku na hloubce řezu u metod AWJ a ASJ při 24% koncentraci suspenze [33].

5. Oblasti možných využití ASJ technologie

5.1 Počátky komerčního využití

V závislosti na technologickém pokroku a specifických požadavcích na řezací systémy je u technologie ASJ sledován především pracovní tlak, průtok pracovního média a spotřeba abraziva. Nejnižší tlaky používané v dnešních komerčních systémech začínají u 35 MPa a nejvyšší přesahují 200 MPa. Současně je tendence snižování průtoku pracovního média a tím také spotřeby abraziva, avšak abychom systém vyvážili a dosáhli požadovaného hydraulického výkonu, je potřeba při takto nízkém průtoku mnohonásobně zvýšit pracovní tlak. Hydraulický výkon řezného paprsku je vlastně součin pracovního tlaku a průtoku, takže je zřejmé, že tato technologie ještě zdaleka nevyužívá svůj plný potenciál. V oblasti výzkumu se objevují i systémy, které využívají pracovního tlaku v rozmezí 200 MPa až 400 MPa při průtoku do 5 l/min, přičemž tyto systémy se mohou využít pro účely strojního obrábění. Komerční implementace je složitá z důvodu velmi vysokých konstrukčních nákladů a obtížné manipulace s abrazivem. Přehled nejtypičtějších využití ASJ technologie je znázorněn na obr. 5.2 [2, 6, 33].

Technologie ASJ, stejně jako AWJ je založená na principu urychlení abraziva, které následně abrazivně narušuje obráběný materiál, jen s tím rozdílem, že ASJ urychluje k trysce již suspenzi složenou z vody a abraziva, což vede k vysoké účinnosti nikoli flexibilitě, z toho důvodu technologie ASJ není příliš používaná pro účely strojního obrábění, ale převážně díky velké účinnosti řezání při obtížných podmínkách se komerčně využívá pro:

- potřeby řezání s dlouhými distančními vzdálenostmi k místu řezu,
- silné a komplexní struktury,
- řezání pod mořskou hladinou,
- demilitarizaci [2, 4, 33].

U technologie AWJ se při snahách o inovaci vždy vědělo o nedostatku v promíchání abraziva s paprskem vody ve směšovací komoře, takže se začalo experimentovat stále více

s axiálním přívodem abraziva do řezací hlavy. Abychom dosáhli co možná nejvyšší rychlosti abrazivních částic, léty experimentů se došlo k závěru, že toho lze dosáhnout suspendováním abraziva s pracovním médiem před průchodem tryskou. Pro zvýšení řezných vlastností, udržení stability paprsku a zabránění usazování suspenze se začaly využívat polymery, které byly úspěšně testované již u technologie WJM. Díky nim se paprsek po průchodu tryskou chová spíše jako koherentní než divergentní [36, 40].

Již v roce 1981 byl pro účely ropných vrtů použit abrazivní suspenzní paprsek generovaný metodou přímého vstřikování. První experimentální zkoušky generování suspenzního paprsku metodou bypass se datují na rok 1985, avšak až do 90. let 20. století použití zařízení s technologií ASJ využívající vysoké průtoky a spotřebu abraziva nebylo pro komerční účely příliš výhodné. Za největší průkopníky v rozvoji ASJ systému lze v té době považovat zejména R. H. Hollingera, Mohameda Hashishe a R. Resnicka. V roce 2001 D. A. Summers s kolektivem předložili výsledky experimentů, které dokazovaly, že správně navržená technologie ASJ dokáže při pracovním tlaku 70 MPa dodat abrazivu stejnou kinetickou energii jako technologie AWJ při tlaku 280 MPa [33,38].

S postupným vývojem technologie ASJ se komerční účely rozšířily o další možnosti využití díky relativně velké distanční vzdálenosti mezi aktivním místem řezu a zařízením generujícím paprsek. Z toho důvodu byly první aplikace ASJ pro podmořské opravy a demontáže již nepoužívaných zařízení, jako jsou například ropné plošiny.

Zvýšení pracovního tlaku v druhé polovině 90. let dovolilo významný pokles průtoků pracovního média. To mělo zvláštní význam pro aplikační oblasti, kde vzniká nepotřebný druhotný odpad, který musí být eliminován, například při řezání v zamořených oblastech, jako jsou jaderné elektrárny. U těchto aplikací je důležitým nákladovým faktorem množství vody a abraziva přivedené do kontaminované oblasti. Toto komerční uplatnění bylo možné využít až při dosažení potřebného pracovního tlaku, což byla hodnota nad 140 MPa. Při této hodnotě lze již využít relativně nízkých průtoků pracovního média. V roce 1999 byla technologie ASJ poprvé komerčně použita pro účely demontáže jaderné elektrárny, a to v Německu. Dle mého názoru bude v budoucnu tato oblast využití stále inovována, protože díky malému průměru trysky je množství vstříknuté kapaliny velmi malé, z čehož plyne malé množství kontaminované vody [4, 6, 33].

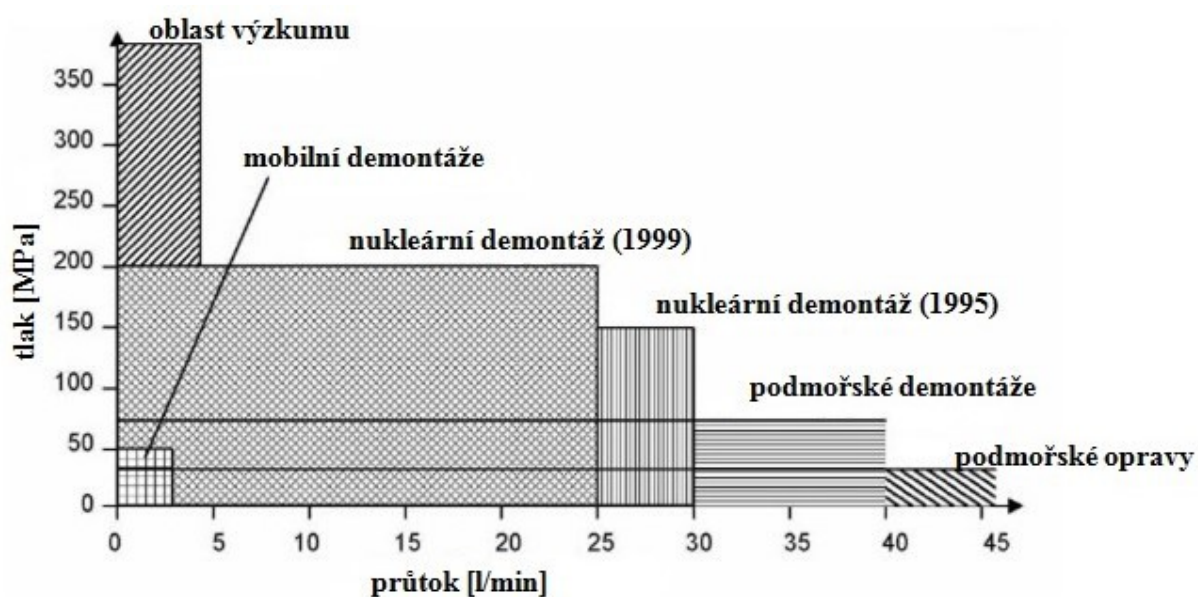
V dnešní době další velkou oblastí uplatnění ASJ je demilitarizace. Technologie ASJ se ukázala jako velmi vhodná pro zneškodnění nevybuchlých bomb či raket. Abrazivní paprsek je schopen řezat prakticky všechny známé materiály bez teplem ovlivněné oblasti,

což je v případě likvidace výbušnin velmi důležité. Důvodem proč se v této oblasti využívá zejména ASJ nikoli AWJ je skutečnost, že technologie ASJ neobsahuje v paprsku vzduch, z toho plyne dodání extra bezpečnosti při demontáži třaskavin, kde existuje riziko vzniku výbuchu z jiskření. Na obr. 5.1 můžeme vidět demontáž protipěchotní střely [2, 4].



Obr. 5.1. Demilitarizace protipěchotní střely ráže 100 mm technologií ASJM [4].

Speciální aplikace ASJ, která je cenově přijatelná, používá pracovní tlak do 50 MPa při průtocích řádově v jednotkách l/min. Takto zkonstruovaný systém se využívá pro speciální mobilní demontáž struktur omezené tloušťky, odstraňování starých nátěrů či čištění potrubí [4].



Obr. 5.2 Hydraulický rozsah komerčního využití ASJ technologie [4].

5.2 Parametry ovlivňující účinnost paprsku.

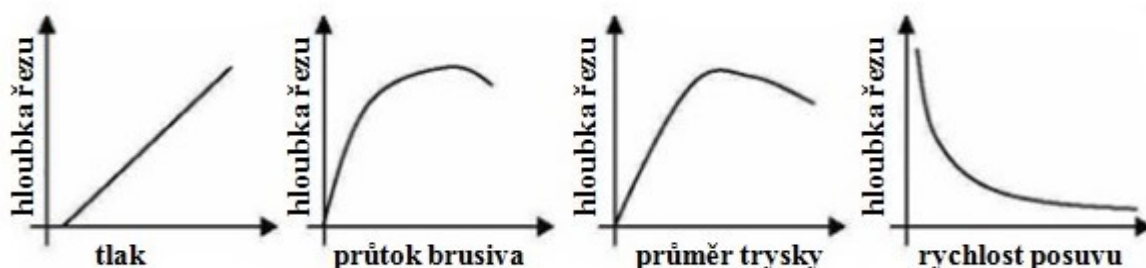
Prvním a rozhodujícím parametrem je pracovní tlak, který určuje jakou rychlostí je přivedená suspenze k trysce, a tím se přímo podílí na určení, jakých erozních účinků bude abrazivní paprsek dosahovat, jaká bude spotřeba abraziva či jaké bude opotřebení celého systému. S rostoucím tlakem roste také hloubka řezu.

Druhým parametrem určujícím účinnost je průtok abraziva určený hodnotou využití abraziva v procesu řezání, což charakterizuje počet právě probíhajících tzv. mikro-odštěpů. Čím více abrazivních částic se zapojí do řezného procesu tím je paprsek soudržnější a účinnější. Dokonce i samotná hodnota průtoku abraziva má své efektivní maximum, po kterém se hloubka řezu již snižuje. To je způsobeno dvěma fakty. Na jedné straně se poměr urychlující vodu a abrazivo snižuje tak, aby byla rychlost paprsku nižší. Na druhou stranu získávají vliv tlumící účinky v místě řezu.

Třetím parametrem je vliv průměru trysky. Zvýšení průměru trysky má hned několik účinků. Zaprvé to vede ke zvýšení hydraulického výkonu, z čehož plyne efektivnější způsob urychlení abraziva. Zároveň s větším průměrem trysky také roste stabilita paprsku, což je důležité při řezání složitých struktur nebo při potřebě dodržení velké vzdálenosti. Na druhé straně se také zvětšuje šířka řezu, takže při určitém průměru trysky již dochází ke snižování účinnosti.

Nicméně parametr, který se nejvíce používá k regulaci hloubky řezu, je rychlost posuvu. Při zvýšení rychlosti posuvu dojde ke snížení hydraulického a abrazivního zatížení.

Závislost nejdůležitějších parametrů na hloubce řezu lze nejlépe demonstrovat na obr. 5.3 [4, 33, 37, 41].



Obr. 5.3 Závislost vlivu hlavních parametrů u technologie ASJM [4].

Technologie ASJ je schopná dosáhnout stejné úrovně výkonu jako konvenční abrazivní systémy, ale s mnohonásobně nižším pracovním tlakem, z čehož plyne vysoká nákladová úspora na vysokotlaké čerpadlo, které je u technologií vodních paprsků nejnákladnější

položkou. Příkladem může být experiment D. A. Summerse a kolektivu publikovaný roku 2001, kde předložili výsledky, které dokazovali, že správně navržený systém ASJ dokáže při pracovním tlaku 70 MPa dodat abrazivu stejnou kinetickou energii jako AWJ systém při tlaku 280 MPa. Další úspora spočívá v tom, že při využití nižšího pracovního tlaku nedochází k tak extrémnímu opotřebení potrubí a armatur [33, 38].

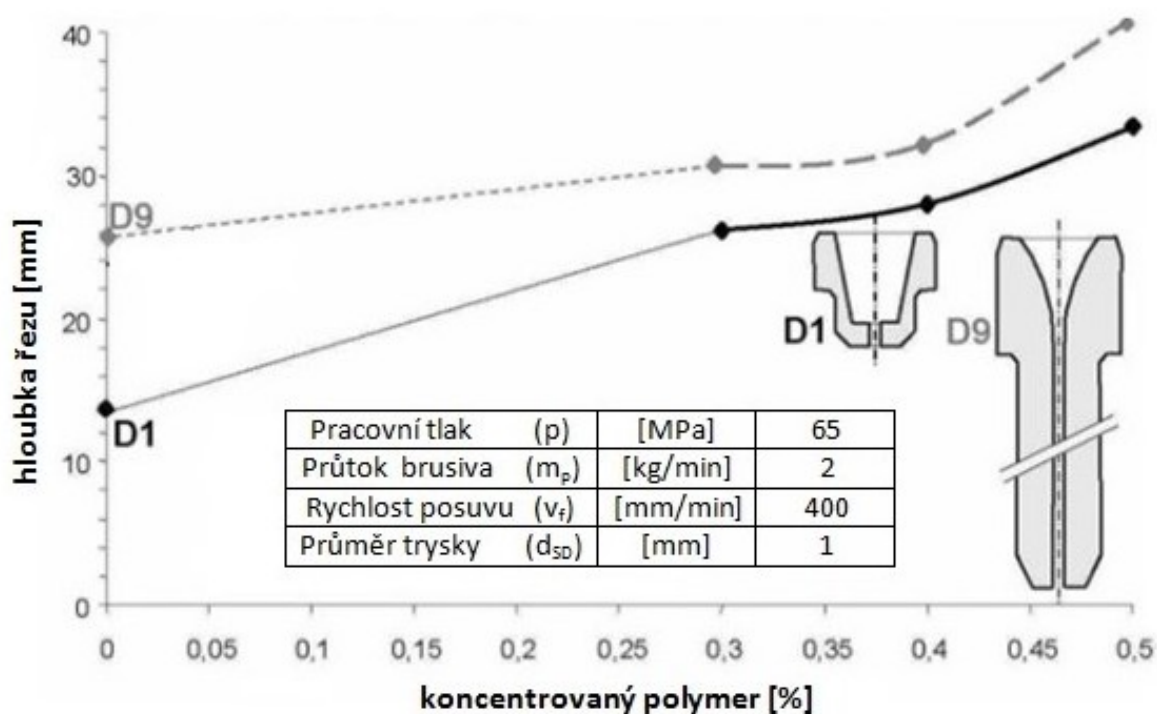
5.3 Vývoj polymerů u technologie ASJ

Abychom udrželi řeznou směs v suspenzi a zajistili tak větší soudržnost paprsku, využíváme pro tyto účely polymery. Vývoj polymerů u ASJ započal již u generování paprsku metodou Indirect pumping, kde byly vysoce koncentrované roztoky polymeru s několikanásobně vyšší viskozitou než voda důležité k udržení suspenze. Metoda Indirect pumping nikdy nedosáhla nějakého většího technologického významu, převážně díky extrémnímu opotřebení komponentů. S polymery se úspěšně za účelem zvýšení stability paprsku experimentovalo i v 70 letech 20. století u metody WJM. Takže zavedení polymerů do metody generování paprsku na principu bypass bylo předvídatelné. Polymery jsou zřetězené dlouhé molekuly, vedené nejen ke zvýšení viskozity ale i na viskoelastické chování kapaliny, kde nejpoužívanější jsou polyakrylamid nebo polyethylenglykol [2, 4, 37].

Obecně existují dva způsoby pro možnost polymerní implementace do systému řezání, prvním je nahrazení přívodové vysokotlaké vody z čerpadla roztokem polymerů. Druhým způsobem je vstříknout vysoce koncentrovaný roztok polymerů pod pracovním tlakem do systému. Druhý způsob má tu výhodu, že polymery procházející čerpadlem nejsou vystavené vysokým smykovým napětím spojené s rizikem mechanického rozkladu.

Během procesu generování paprsku se v suspenzní trysce zvyšuje viskozita, to zapříčiní posunutí Reynoldsova čísla průtoku k nižší hodnotě, což vede k intenzivnějšímu procesu zrychlení částic. Z toho plyne zlepšení procesu odstraňování materiálu. Avšak nedochází jen k efektivnějšímu urychlování částic, ale také stabilita paprsku je použitím polymerů zvýšena, zejména pozitivně ovlivňuje odolnost proti sedimentaci částic v suspenzi. Oba efekty pozitivně ovlivňují řezný potenciál u technologie ASJ, přičemž pro názornost můžeme na obr. 5.4 vidět, jak se zvětší efektivní hloubka řezu přidáním koncentrovaného roztoku polymerů. Tento experiment byl proveden u dvou typů trysek s rozdílnou délkou

na materiálu z hliníkové slitiny za použití polymeru typu Polyox Coagulant a abraziva australský granát se střední zrnitostí [2, 4, 37, 41].



Obr. 5.4 Řezací účinnost podpořená koncentrovaným polymerem [37].

Tento experiment nádherně dokázal, jak vhodný výběr implementovaných polymerů v abrazivní suspenzi umožňuje zintenzivnit řezný proces, stejně jako navýšit stabilitu. Zejména navýšení stability má velkou váhu v procesech demontáže, kde jsou malé vzdálenosti a složité struktury k rozdělení. Zejména pro komplexní demontáže se ukazuje ASJ generovaná metodou bypass s použitím polymerů jako velmi výhodné řešení [4].

5.4 Studie DIAjet systému

Myšlenka přidávání abraziva při řezání vodním paprskem, před vstupem vysokotlakého pracovního média do hlavní trysky byla zkoumána na Cranfield University ve Velké Británii, kde po letech výzkumu přišli s tzv. DIAjet systémem (viz obr. 3.6b). První experimenty byly hlášeny v roce 1986, které ukázaly, že takto zkonstruovaný systém byl

schopen proříznout 13 mm tlusté ocelové desky při rychlosti posuvu 51 mm/min, kdy se jako abrazivo použila měděná struska. Následně našel tento typ zařízení pracující s tlakem 35 MPa a průtokem dosahujícím až 70 litrů za minutu dokonce komerční uplatnění v průmyslovém řezání, pro potřebu obrábění titanu a pancíře, avšak produktivita nebyla na příliš vysoké úrovni. Následující komerční využití tohoto systému bylo v roce 1988 v rafinérii Philips-Imperial, která zpracovávala ropné oleje. Generovaný paprsek se využíval k odstranění znečištěného kovového obložení na destilačních sloupcích. Zvolená technologie musela být schopna řezat konstrukčně složité nosné konstrukce a pracovat v prostředí s nebezpečím výbuchu, jelikož existovalo riziko výskytu plynu. Při tlaku 27,5 MPa s rychlostí posuvu 150 mm/min a využitím měděné strusky jako abraziva, byl tento přístroj schopen prorážet ocelové pláty tloušťky 20 mm, při takto stanovených parametrech byla efektivní životnost trysky 7 - 25 hodin [4, 33, 42].

Práce proběhla v plánovaném časovém intervalu. Z důvodu úspěšné aplikace pro komerční účely se zrychlila snaha o inovaci zařízení, takže v létě roku 1990 proběhl experiment, při kterém se porovnávaly parametry této technologie při pracovních tlacích 34,5 MPa a 69 MPa na oceli tloušťky 13 mm. Avšak k dalšímu komerčnímu uplatnění DIAjet systému již téměř nedošlo. Experimentální tryska ovšem dokázala, že u axiálního přívodu abraziva dochází ke kvalitnímu promíchání vody a abraziva. Tyto poznatky posloužily k dalšímu rozvoji ASJ. Porovnání je znázorněné v tab. 5.1 [43].

Tab. 5.1 Porovnání řezných parametrů při různých pracovních tlacích [43].

Řezné parametry		Tlak	
		34,5 MPa	69 MPa
Rychlost posuvu	[mm/min]	300	150
Hloubka řezu	[mm]	2,8	0,75
Průtok vody	[l/min]	85	9
Průtok abraziva	[kg/min]	10	0,75
Hydrokinetická energie	[kW]	50	10
Vytvořený povrch	[mm ² /kg]	390	2600
Vytvořený povrch	[mm ² /kW]	78	195
Vytvořený povrch	[mm ² /l]	46	216

5.5 Budoucnost technologie

Na základě již dosaženého vývoje abrazivního vodního paprsku vytvořeného technologií ASJ se v komerčním využití předpokládá stále větší podpora zejména v oblasti robotiky. Jedním ze směrů je také vývoj vyššího tlakového systému, který by byl schopen řezat materiály rychleji a provádět čistší řez, avšak u takto nastavených vstupních parametrů dochází k obrovskému opotřebování komponentů, z čehož plyne také snaha o vývoj extrémně pevných otěruvzdorných materiálů [43].

Experimenty v oblasti ASJ jsou rozsáhlé. V posledních letech se pole působnosti rozšiřuje o možnost využití technologie při kovovém broušení a leštění. U tohoto případu je paprsek poněkud odlišný, než tomu bylo doposud, a stále se na této variantě využití pracuje. Avšak předběžné experimenty prokázaly, že takto zkonstruovaný proces snižuje v některých případech náklady na broušení až o 12 %. To znamená, že další potenciální využití technologie ASJ pro aplikaci do různých oblastí průmyslu je jen stěží vymezeno. Lze ovšem říci, že většina vývojových center se zaměřuje spíše na zlepšení jakosti pracovní plochy nikoli na progresivnější úběr materiálu.

Schoenig a jeho kolegové například uvedli, že vytvořením pracovního tlaku většího než 350 MPa pro generování paprsku metodou bypass lze dosáhnout většího řezného výkonu díky zvětšené délce řezného nástroje až o 1000 %, a zvýšené řezné rychlosti o 1,5 až 2,5 násobek. Tento druh inovace a některé další se v průmyslu stále vyvíjejí pro jejich širší aplikovatelnost, takže se dle mého názoru můžeme těšit opět v blízké době na novou komerční jednotku využívající princip ASJ [33, 34].

Závěr:

Tato má závěrečná práce je zaměřená na možnosti komerčního uplatnění vodního paprsku generovaného pomocí technologie ASJ. Pro dosažení cíle jsem využil kvalitativní analýzu dokumentů v dané oblasti, tedy jinými slovy vytvořil literární rešerši.

Úvodní kapitola je zaměřená na historický vývoj vodních paprsků a jejich postupného začleňování do průmyslu. V následující části rozebírám zařazení vodních paprsků v oblasti nekonvenčních technologií, podrobný popis nejpoužívanějších metod využívající k rozrušení materiálu erozivní energii vodního paprsku. Konkrétně se jedná o technologie WJM, AWJM, IJM, ASJM a tzv. pulzní paprsek, přičemž pro úplnost jsem zmínil i technologii DWJ, která primárně slouží k zlepšení jakosti obráběných ploch. V této části je také uveden přehled nejdůležitějších výhod a nedostatků vodních paprsků.

Pro porozumění a pochopení fungování celého systému jsou ve třetí kapitole podrobně rozebrané všechny nejdůležitější komponenty, nezbytné pro bezproblémový chod. Další část závěrečné práce porovnává technologii AWJ a ASJ podle téměř všech technologických a účinnostních rozdílů, přičemž za hlavní rozdíl lze považovat fakt, že u technologie ASJ prochází tryskou pod vysokých tlakem, již řezná směs udržovaná v suspenzi nikomu pouze voda jak tomu je u technologie AWJ. To má za následek, že technologie ASJ pracuje s menším průměrem paprsku, nižšími pracovními tlaky, většími objemovými průtoky, většími rychlostmi řezání a nižší spotřebou vody než technologie AWJ. Mimoto paprsek generovaný technologií ASJ je dvousložkový složen přibližně z 95 % vody a 5 % abraziva, tedy bez přítomnosti vzduchu. Proto se ASJ vyznačují efektivnějším způsobem urychlování částic a vyšší paprskovou stabilitou, díky čemuž dosahují vyšší řezné účinnosti. Naproti tomu se technologie AWJ vyznačuje vysokou flexibilitou.

Poslední část práce je zaměřena na vývoj, popis a pochopení principu technologie ASJ. Na základě dostupných literárních zdrojů uvádím možné komerční využití i předpokládané využití v horizontu dalších let. Technologie ASJ je charakteristická svojí vysokou účinností, zejména díky dobrému promíchání abraziva s vodou. Z toho důvodu se technologie ASJ využívá například v oblasti demilitarizace či vyřazování složitých konstrukcí pod i nad vodní hladinou. Díky relativně dlouhé vzdálenosti mezi zařízením generující paprsek a aktivním místě řezu lze technologii použít pro komplexní demontáže

v těžce dostupných či zamořených oblastech. V posledních letech se technologie dostává do povědomí ve spojení s kovovým broušením a leštěním.

Nutno podotknout, že progresivní technologie vodních paprsků se díky svému komplexnímu rozvoji do mnoha oblastí průmyslu stává obrovským komerčním hitem, který oslovuje stále více firem. Nemám na mysli pouze technologii ASJ, ale také technologii pulzujícího vodního paprsku či začleňování vodních paprsků řízených technologií Dynamic Water Jet do oblasti robotiky. V některých případech dokonce nahrazuje již zažitě nekonvenční technologie či dokonce je v některých oblastech díky svým pozitivním vlastnostem nenahraditelnou variantou.

Seznam použitých zdrojů

- [1.] Flow International Corporation. [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z :
<<http://www.flowwaterjet.com/>>
- [2.] Tribology in Water Jet Processes. SHIMIZU, Seiji. *New Tribological Ways* [online]. China: Intech, 2011, s. 14 [cit. 2016-11-27]. ISBN 978-953-307-206-7. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/new-tribological-ways/tribology-in-water-jet-processes>
- [3.] ŠUPOLÍKOVÁ, G. *Zpracování odpadních materiálů po aplikaci abrazivního vodního paprsku*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [4.] ABRASIVE WATER SUSPENSION JET TECHNOLOGY – FUNDAMENTALS, APPLICATION AND DEVELOPMENTS. LOUIS, H., F. PUDE, CH. VON RAD a R. VERSEMAN. WELDNET [online]. 2009 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z:
<http://www.china-weldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>
- [5.] Sitek, Libor ; Foldyna, Josef ; Švehla, Branislav. *Vodní paprsek ve strojírenství*. Strojárstvo - strojírenství, 2004, Roč. 8, č. 5, s. 100-101. ISSN 1335-2938.
- [6.] KRAJNÝ , Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava : EPOS, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [7.] *TŘÍPLUNŽROVÉ ČERPADLO K55000*. Sigmet spol. s r.o. , tř. Kosmonautů 1103/6a, 77900 Olomouc, 2008. Dostupné z:
<http://www.sigmet.cz/soubory/55/k55000.pdf>
- [8.] *VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO ECOTRON: ECOTRON 40.37*. [online]. Austria: Best Fluid Technology, 2015 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://cz.bft-pumps.com/Rezani-vodnim-paprskem/VYSOKOTLAKE-CERPADLO-Ecotron>
- [9.] Strojnílyceum.wz. [online]. 2008 [cit. 2017-01-12]. *Fyzikální technologie obrábění*. Dostupé z : < <http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf> >.
- [10.] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem*. Glassrevue [online]. 2007 , č. 4 [cit. 2017-01-05]. Dostupný z: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>>.
- [11.] Flow International Corporation. [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z:
<<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>>.

- [12.] WANG, Fun-Den, Levent OZDEMIR a Russell J. MILLER, ed. *Proceedings of the first U.S. Water Jet Symposium*. Golden, Colorado: Colorado School of Mines, 1981.
- [13.] HÍŘEŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. *Delenie kovových materiálů okružnou pilou, vodním proudem a plazmovým oblúkem*, 1.vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [14.] BRYM, Radek. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno. 2008. [online], [vid. 2017-03-22]. Dostupné z: < http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5167 >.
- [15.] VALÍČEK, Jan a Sergej, HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vydání. Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [16.] PTV, spol. s.r.o. [online]. [cit. 2017-03-25]. *Abrazivo*. Dostupné z:< <http://www.ptv.cz/> >
- [17.] MAŇKOVÁ, Ildiko. *Progresívne technológie*. 1. vydání. Vienaľa Košice, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [18.] CryoJet. [online].Wikimedia Commons. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z : < <http://en.wikipedia.org/wiki/CryoJet> >
- [19.] *Basic waterjet principles* [online]. 2009 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <<http://waterjets.org/how-abrasive-waterjets-work/>>
- [20.] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.*. 1. vydání. Ostrava : VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [21.] KRAJNÝ, Z. *Vysokotlaký vodný lúč – WJM*. Bratislava: Uraca, Jún 2011, 172 s. ISBN 978-80-227-3535-3
- [22.] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. ČÁST: Obrábění vodním paprskem*. Brno, 2005.

- [23.] HLAVATÝ, Ivo. VŠB – Technická univerzita Ostrava [online]. [cit. 2017-04-05].
Dostupné z: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>
- [24.] MILLER, Richard Kendall. Waterjet cutting : technology and industrial applications. Lilburn, GA : Fairmont Press, c1991, 154 p. ISBN 08-817-3068-8
- [25.] FOLDYNA, J. *Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků*. Ostrava, 1996. Dizertační práce. Akademie věd České republiky. Ústav geoniky Ostrava.
- [26.] SITEK, Libor, Lenka BODNAROVA, Josef FOLDYNA a Jiri KLICH. Využití nových poznatků při sanacích betonových konstrukcí vysokorychlostními vodními paprsky. Brno, 2012. ISBN 1211-3700.
- [27.] SITEK, Libor, FOLDYNA, Josef. 2002. *Možnosti využití modulovaného vodního paprsku při sanaci betonu*. Beton TKS 2/2002: pp.38 – 41, ISSN 1213-3116
- [28.] PULSATING WATER JET AS A TOOL FOR BASALT SURFACE TREATMENT. SITEK, Libor, Jiri KLICH, Josef FOLDYNA a Jiri SCUCCA. : Pulsating water jets. Krakov, 2011, s. 63-71. ISBN 978-83-930353-4-2.
- [29.] ŘASA, J., GABRIEL, V., POKORNÝ, P. *Strojírenská technologie 3. Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie, 2. díl*. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-7183-336-3
- [30.] van Luttervelt, C.A.: On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials, Annals of the CIRP Vol.39/2 (1989), pp. 587-607.
- [31.] KOČMAN, K a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1992-2.
- [32.] PTV s.r.o. Firemní materiály "Technologie vysokoenergetického kapalinového paprsku". Hostivice, 2005.
- [33.] HASHISH, M., "Cutting with High-Pressure Abrasive Suspension Jets" paper 33, 6th American Water Jet Conference, Houston, TX, August, 1991, pp. 439-455.

- [34.] BORKOWSKI, J., and Mazurkiewicz, M., "Aluminum Grinding With High Pressure Water Jet Assistance," paper 25, 5th American Water Jet Conference, Toronto, Canada, August, 1991, pp. 253-261.
- [35.] HOLLINGER, R.H., Perry, W.D., a Swanson, R.K., "Precision Cutting With A Low Pressure Coherent Abrasive Suspension Jet," paper 24, 5th American Water Jet Conference, Toronto, Canada, August, 1989.
- [36.] ANT APPLIED NEW TECHNOLOGIES AG [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: < <http://ant-ag.com/en/company.html> >
- [37.] BORTOLUSSI, A., CICCUCI, D., GROSSO, B., Cutting of Reinforced Concrete Using Abrasive Suspension Jet, Sborník přednášek WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, 2001, str. 98 - 113
- [38.] D.A. Summers, R.D. Fossey, J.W. Newkirk, G. Galecki, UMR; M. Johnson, NSWG; G. Olson, DAC, "Results of Comparative Nozzle Testing Using Abrasive Waterjet Cutting," 2001, American Waterjet Conference, Minneapolis, MN, August 18-21, 2001.
- [39.] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London: E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [40.] W. S. Luo, C. Y. Wang, Y. X. Song, Y. P. Liao, "Characteristics and Polishing Effect of Abrasive Jet Beam with Polymer Abrasive Suspension Additives", *Advanced Materials Research*, Vols. 126-128, pp. 9-13, 2010
- [41.] MOMBER, W. A. a Radovan KOVACEVIC. *Principles of Abrasive Water Jet Machining: Generation of Suspension-Abrasive Water Jets*. London: Springer-Verlag, 1998. ISBN 978-1-4471-1574-8.
- [42.] FIRHURST, R.M., a ROFF, M.F., "A field application of a DIAjet Abrasive Water Jet Cutting Technique" paper H2, 9th International Symposium on Jet Cutting Technology. Sendai, Japan, pp. 399 – 409.
- [43.] MILLER, D.S., a BLOOMFIELD, E.J., "The Future for Abrasive Jet Cutting," paper 42, 6th American Water Jet Conference, August, 1991, Houston, TX, pp. 561 – 574.3
- [44.] High pressure filters. *Resato International B.V* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: < <https://www.resato.com/de/components/valves-and-fittings/high-pressure-filters> >
- [45.] *Monitors - Water Cannons of Hydraulic Mining: Photo Gallery* [online]. 2009 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: < <https://www.sierracollege.edu/ejournals/jsnhb/v2n1/monitors.html> >

Seznam obrázků

Popis	Strana
Obr. 1.1 Využití hydromonitorů při dobývání nerostů [45]	13
Obr. 2.1 Schematické rozdělení nekonvenčních metod obrábění [20]	18
Obr. 2.2. Schematické rozdělení kapalinových paprsků [15]	19
Obr. 2.3 Schematické rozdělení vodních paprsků [6]	20
Obr. 2.4 Aplikace vodních paprsků v závislosti na tlaku a průtoku [6]	21
Obr. 2.5 Znázornění čistého vodního paprsku [23]	24
Obr. 2.6 Schematické znázornění technologie AWJM [5]	25
Obr. 2.7 Technologie IJM [18]	26
Obr. 2.8 Přehled stupňů kvality řezu [23]	27
Obr. 2.9 Princip generování pulzujícího vodního paprsku [28]	30
Obr. 2.10 Schematické znázornění metody Direct a Indirect pumping [2]	32
Obr. 2.11 Schematické znázornění metody Bypass principle [2]	33
Obr. 2.12 Komerční zařízení pro technologii ASJM [4]	33
Obr. 3.1 Schematické znázornění vysokotlakého čerpadla s multiplikátorem [8]	34
Obr. 3.2 Vysokotlaké čerpadlo ECOTRON 40.37 s multiplikátorem [8]	36
Obr. 3.3 Princip funkce triplunžrového čerpadla K 55000 [7]	37
Obr 3.4 Pracovní řezací hlava pro čistý vodní paprsek [29]	39
Obr. 3.5 Abrazivní řezací hlava [1]	40
Obr. 3.6 Řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsky [31]	41
Obr. 3.7 Geometrické tvary nejpoužívanějších typů trysek [6]	42
Obr. 3.8 Vysokotlaké potrubí pro vedení pracovního média [14]	43
Obr. 3.9 CNC souřadnicový stůl společnosti PTV (model cobra) [16]	46
Obr. 3.10 Systém dopravy abraziva [1]	47
Obr. 3.11 Rozhraní softwaru Flow MASTER [1]	48
Obr. 3.12 Nízkotlaký filtr [16]	49
Obr. 3.13 Vysokotlaký filtr [44]	49
Obr. 3.14 Vysokotlaká sada těsnění od firmy PTV [16]	49
Obr. 3.15 Australský granát typu GMA [16]	52
Obr. 4.1 Závislost tlaku na hloubce řezu u metod AWJ a ASJ při 12% koncentraci suspenze [33]	56

Popis	Strana
Obr. 4.2 Závislost tlaku na hloubce řezu u metod AWJ a ASJ při 24% koncentraci suspenze [33]	56
Obr. 5.1. Demilitarizace protipěchotní střely ráže 100 mm technologií ASJ [4]	59
Obr. 5.2 Hydraulický rozsah komerčního využití ASJM technologie [4]	59
Obr. 5.3 Závislost vlivu hlavních parametrů u technologie ASJM [4]	60
Obr. 5.4 Řezací účinnost podpořená koncentrovaným polymerem [37]	62

Seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
2.5D	[-]	2,5 Dimensions
AFM	[-]	Abrasive Flow Machining
AJM	[-]	Abrasive Jet Machining
Al₂O₃	[-]	oxid hlinitý
ASJ	[-]	Abrasive Suspension (Slurry) Jet
ASJM	[-]	Abrasive Suspension (Slurry) Jet Machining
AWJ	[-]	Abrasive Water Jet
AWJM	[-]	Abrasive Water Jet Machining
BFT	[-]	Best Fluid Technology
CAD	[-]	Computer-Aided Design
CAM	[-]	Computer-Aided Manufacturing
CaO	[-]	oxid vápenatý
CM	[-]	Chemical Machining
CNC	[-]	Computer Numerical Control
ČSAV	[-]	Československá akademie věd
DIAjet	[-]	Direct Injection Abrasive Jetting
DWJ	[-]	Dynamic Water Jet
EBM	[-]	Electron Beam Machining
EDM	[-]	Electro Discharge Machining
Fe₂O₃	[-]	oxid železitý
FeO	[-]	oxid železnatý

Zkratka	Jednotka	Popis
IBM	[-]	Ion Beam Machining
IJM	[-]	Ice Jet Machining
LBM	[-]	Laser Beam Machining
MESH	[-]	počet ok fiktivního síta na čtvereční palec
MgO	[-]	oxid hořečnatý
MnO	[-]	oxid manganatý
NASA	[-]	National Aeronautics and Space Administration
NC	[-]	Network Computer
PAA	[-]	polyakrylamid
PAM	[-]	Plasma Arc Machining
PBM	[-]	Plasma Beam Machining
PCM	[-]	Photochemical Machining
PEO	[-]	polyethylenoxid
RCC	[-]	reinforced carbon-carbon
SiO₂	[-]	oxid křemičitý
TiO₂	[-]	oxid titaničitý
UHP	[-]	ultrahigh pressure
USM	[-]	Ultrasonic Machining
WJM	[-]	Water Jet Machining

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
C_0	[m/s]	rychlost zvuku v pracovním médiu
d_{SD}	[mm]	průměr trysky
m_p	[kg/min]	průtok abraziva
p_1	[Pa]	tlak působící na plochu S_1
p_2	[Pa]	tlak vyvolaný na ploše S_2
p_i	[Pa]	impaktní tlak
p_s	[Pa]	stagnační tlak
psi	[Pa]	libra síly na čtverečný palec (pound per square inch)
S_1	[mm ²]	plocha 1. pístu
S_2	[mm ²]	plocha 2. pístu
V_0	[m/s]	rychlost paprsku
v_f	[mm/min]	rychlost posuvu
v_P	[mm/min]	řezná rychlost
η_M	[-]	ztrátový koeficient tlaku